

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES



Facultad de Ingeniería

TESIS

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL
PARA EL TRATAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN LAS
CALLES DE LA URBANIZACIÓN SAN LUIS DE LA
CIUDAD DE ABANCAY

Para optar el título de

Ingeniero Civil

Presentado por:

Bachiller José Johel LÓPEZ SUMARRIVA

Bachiller Grely ORTIZ PINARES

Abancay – Apurímac – Perú

2018

TESIS

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL
PARA EL TRATAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN LAS
CALLES DE LA URBANIZACIÓN SAN LUIS DE LA
CIUDAD DE ABANCAY**

Línea de Investigación

Geotecnia

Asesor

Ing. Hugo Virgilio ACOSTA VALER

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años.

A mi esposa e hijo por el apoyo incondicional.

Gracias a todos ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

José Johel

DEDICATORIA

A mis padres Sergio y Florentina,
quienes me inculcaron principios y
valores; a mi esposa Doris, por su apoyo
y comprensión; a mi hijo Leonardo
Fabián, por su amor inmenso; a mis
hermanas por su constante apoyo y
cariño, y a José Johel, por su amistad
invaluable.

Grely Ortiz Pinares.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
DEDICATORIA	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE IMÁGENES	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xii
RESUMEN	xiii
SUMMARY	xv
INTRODUCCIÓN	xvii
CAPÍTULO 1.....	20
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.1.1. Descripción de la realidad problemática.	20
1.1.2. Identificación y formulación del problema	20
1.1.3. Objetivos de la investigación	21
1.1.4. Justificación y viabilidad de la investigación.....	22
1.1.5. Delimitaciones de la investigación.....	23
1.1.6. Limitación de la investigación	23
CAPÍTULO II.....	24
2.1. MARCO TEÓRICO.....	24
2.1.1. Antecedentes de la investigación	24

2.2. BASES TEÓRICAS	27
2.2.1. Estabilización de suelos	27
2.2.2. Tipos de estabilización de suelos	28
a) <i>Estabilización por medios mecánicos</i>	28
b) <i>Estabilización por combinación de suelo</i>	28
c) <i>Estabilización por medios electrónicos</i>	28
d) <i>Estabilización por medios químicos</i>	28
2.2.3. Definición de la cal	29
2.2.4. Suelos arcillosos.....	31
2.2.5. Subrasante	31
2.2.6. California Bearing Ratio (CBR).....	32
2.2.7. Estabilización de suelos con cal	34
2.2.8. La química del tratamiento con cal	35
2.2.8.1. <i>Secado</i>	35
2.2.8.2. <i>Modificación</i>	35
2.2.8.3. <i>Estabilización</i>	36
2.2.8.4. <i>Reacción química de la cal con arcillas</i>	37
2.2.9. Influencia de la cal en las características de los suelos	38
2.2.10. Influencia de la cal sobre las constantes físicas del suelo	39
2.2.11. Propiedades de la estabilización de suelos con cal	41
2.2.12. Estabilización de la subrasante.....	42
2.2.13. Diseño de la mezcla suelo-cal	42
2.2.14. Obtención de parámetros.....	43

2.2.15.	Obtención de la cal óptimo	43
2.2.16.	Estabilización con otros agentes químicos.....	44
2.3.	FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	48
2.3.1.	Hipótesis general.....	48
2.3.2.	Hipótesis específicos.....	48
2.4.	OPERACIÓN DE VARIABLES	48
2.4.1.	Variable independiente	48
2.4.2.	Variable dependiente.....	49
2.5.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	49
CAPÍTULO III:.....		57
3.1.	METODOLOGÍA	57
3.1.1.	Tipo y nivel de investigación	57
3.1.2.	Diseño de investigación	57
3.1.3.	Población y muestra de la investigación población	57
3.1.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	58
3.1.5.	Técnicas y procesamiento de datos	59
3.2.	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS	61
3.2.1.	Muestreo de suelo (MTC E101-2000)	61
3.2.2.	Calidad de cal.....	64
3.3.	DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO – MECÁNICAS DEL SUELO EXISTENTE EN LA SUBRASANTE DE LA URBANIZACIÓN SAN LUIS DE LA CIUDAD DE ABANCAY	65
3.3.1.	Ensayos de laboratorio al suelo natural.....	65

3.3.2. Ensayos para la determinar el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo y porcentaje de cal óptimo.....	68
3.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	83
3.4.1. Propiedades del suelo en estado natural.....	83
3.4.2. Propiedades del suelo estabilizado con cal	85
3.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
3.5.1. Conclusiones	88
3.5.2. Recomendaciones.....	90
CAPÍTULO IV	91
4.1. ASPECTO ADMINISTRATIVO	91
4.1.1. Cronograma de actividades.....	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS	95
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	95
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	97
Estabilización de suelos con cal	97
Conservación.....	105
Limitaciones en la ejecución	105
Aceptación de los trabajos	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2 Características Físicas de la cal	30
Tabla 3 Categoría de la Sub-rasante	32
Tabla 4 Categoría de la Subrasante.....	33
Tabla 5 Categoría de la Subrasante (base).....	33
Tabla 6 Clasificación del suelos según el CBR	33
Tabla 7 Contenido de Humedad	65
Tabla 8 Ensayo de Granulometría	66
Tabla 9 Coeficientes de Curvatura y Uniformidad	66
Tabla 10 Límites de Consistencia.....	67
Tabla 11 Densidad máxima	67
Tabla 12 CBR	68
Tabla 13 Ensayo de EADES & GRIM	69
Tabla 14 Ensayos de % de humedad suelo estabilizado.....	71
Tabla 15 Límite Líquido de suelo Estabilizado	73
Tabla 16 Límite Plástico de suelo Estabilizado	74
Tabla 17 Índice de Plasticidad de Suelo Estabilizado	76
Tabla 18 Densidad Máxima de Suelo Estabilizado	77
Tabla 19 Humedad Optima de Suelo Estabilizado	78
Tabla 20 Ensayos de CBR suelo Estabilizado	81

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Ubicación del tramo en estudio	60
Imagen 2: Ubicación de las calicatas	60
Imagen 3: Extracción de la muestra en el progresiva 0+250 Av. Molinopata.....	61
Imagen 4: Vista panorámica de la Calicata 01	62
Imagen 5: Vista de la Estratigrafía de la calicata 01.....	62
Imagen 6: Extracción de la muestra en el progresiva 0+550 Av. Santo Domingo.....	63
Imagen 7: vista de la estratigrafía de la muestra 02.....	63
Imagen 8: % de cal mediante el ensayo de EADES & GRIM Muestra 01.....	70
Imagen 9: % de cal mediante el ensayo de EADES & GRIM Muestra 02.....	70
Imagen 10: Gráfico del Contenido de humedad de suelo estabilizado M-01	71
Imagen 11: Gráfico del Contenido de humedad de suelo estabilizado M-02.....	71
Imagen 12: Ensayo de contenido de humedad suelo estabilizado	72
Imagen 13: Ensayo de contenido de humedad suelo estabilizado	72
Imagen 14: Gráfico del límite líquido suelo estabilizado M-01	73
Imagen 15: Gráfico del límite líquido suelo estabilizado M-02	73
Imagen 16: Ensayo de Límite Líquido de Suelo Estabilizado.....	74
Imagen 17: Ensayo de Limite Líquido de Suelo Estabilizado.....	74
Imagen 18: Gráfico del Límite Plástico de suelo estabilizado M-01.....	75
Imagen 19: Gráfico del Límite Plástico de suelo estabilizado M-02.....	75
Imagen 20: Ensayo de Límite Plástico de suelo estabilizado	76
Imagen 21: Ensayo de Límite Plástico de suelo estabilizado	76
Imagen 22: Gráfico del Índice de plasticidad suelo Estabilizado M-01	77
Imagen 23: Gráfico del Índice de plasticidad suelos Estabilizado M-02	77
Imagen 24: Gráfico Densidad Máxima de suelo Estabilizado M.01	78

Imagen 25: Gráfico Densidad Máxima de suelo Estabilizado M.02	78
Imagen 26: Gráfico de Humedad Óptima de Suelo Estabilizado M-01	79
Imagen 27: Gráfico de Humedad Óptima de Suelo Estabilizado M-02	79
Imagen 28: Ensayo de Compactación suelo Estabilizado	80
Imagen 29: Ensayo de Compactación suelo Estabilizado	80
Imagen 30: Gráfico del CBR de suelo estabilizado M-01	81
Imagen 31: Gráfico del CBR de suelo estabilizado M-02	81
Imagen 32: Ensayo de CBR de suelo estabilizado	82
Imagen 33: Ensayo de CBR de suelo estabilizado	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Moléculas de la Cal	30
Ilustración 2 Cal.....	30
Ilustración 3 Suelo Arcilloso	31
Ilustración 4 Partículas de Arcilla Sin Cal.....	38
Ilustración 5 Partículas de Arcilla con Cal	38

RESUMEN

El presente proyecto de tesis consistió en la determinación del porcentaje óptimo de cal que se debe agregar a la subrasante de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay, para luego ser utilizado como base estabilizada para que este suelo estabilizado forme parte de la estructura de los diversos tipos de pavimentos, el porcentaje óptimo de cal se obtuvo mediante los ensayos de laboratorio y aquellos métodos recomendados en los manuales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, norma CE. 010 y otras normas afines vigentes.

Las muestras analizadas fueron obtenidas de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la Urbanización San Luis Baja de la ciudad de Abancay. Los mismos que se muestran indicados en los planos de ubicación de calicatas.

El procedimiento aplicado para determinar el porcentaje de cal óptimo, consistió en definir las propiedades físicas del suelo como la resistencia al esfuerzo cortante, contenido humedad, compactación y la plasticidad que adquirió el suelo al ser mezclado con cal, agregando porcentajes de cal de 0 a 8%, en intervalos de 2% a las muestras de suelo. Para luego, determinar su resistencia al corte (CBR).

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal, determinar las ventajas técnicas de la estabilización de las subrasantes arcillosas con cal, para ser utilizado como base o subbase para los pavimentos de las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.

Siguiendo con la normativa establecida en el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones y el ASTM C-25 Ensayos de laboratorio para cal. En los cuales indican que cuando el CBR varía entre el 6% y 10%, se recomienda que el suelo deberá ser reemplazado o mejorado, ya que son suelos inadecuados. Por lo tanto, se procedió a realizar el estudio de suelos en la

Urbanización San Luis. Dando como resultado que el suelo de la calicata 01, se clasificó como una arena limo – arcillosa (SC-SM) y el suelo de calicata 02 se clasificó como una arena limosa (SM), arrojando valores relativamente bajos, el primero con un valor de CBR de 8.75% y un porcentaje de expansión del 16.75%.

Al no cumplir las especificaciones establecidas en las normas antes indicadas, primero se decidió utilizar el método de Eades & Grim (ASTM D 6276) con la finalidad de obtener el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo, el cual consistió en medir el valor de pH de las muestras de suelo – cal, determinando el porcentaje de cal con el objetivo de determinar la efectividad de la estabilización. El resultado obtenido en la prueba de pH para la primera muestra indicó que el suelo requiere de 3% de cal, para la segunda muestra se requiere 5% de cal en peso para lograr su objetivo. Y como segundo método se procedió a realizar los ensayos en el laboratorio con la finalidad de obtener las características físicas del suelo. Para ello, se elaboraron especímenes de 0%, 2%, 4%, 6% y 8% de cal en peso del suelo seco, que se compactaron y saturaron para luego determinar los valores del esfuerzo cortante (CBR) para cada una de las muestras. Obteniéndose como resultado para la primera muestra que al añadirle un 8% de cal se obtuvo un valor de CBR del 145.00%, para la segunda muestra agregándole 8% de cal se obtuvo un valor de CBR de 69% muy por encima de lo exigido en los manuales del MTC.

Finalmente, al comparar el suelo – cal con el suelo en estado natural, se redujo su plasticidad y el porcentaje de expansión. Por lo que el porcentaje de 8% de cal es satisfactorio para lograr la estabilización del suelo analizado, cumpliendo así, con las especificaciones establecidas en el manual de especificaciones técnicas del MTC.

Palabras Clave: estabilización con cal, estabilización de suelos arcillosos, estabilización de suelos limosos, mejoramiento de sub rasante.

SUMMARY

This thesis was to determine the optimal percentage of lime to be added to the subgrade of the shreds of Molinopata and Santo Domingo de la Construction San Luis of Abancay, and then be used as stabilized base for It stabilized soil this part of the structure of various types of pavements, the optimal percentage of lime was obtained by laboratory tests and those recommended in the manuals Ministry of Transport and Communications, CE standard methods. 010 and related regulations.

The samples analyzed were obtained from the shreds of Molinopata and Santo Domingo of Urbanization San Luis Baja city of Abancay. The same as shown in the drawings indicated location of test pits.

The procedure used to determine the percentage of optimum lime, was to define the physical properties of soils such as shear strength with moisture, compaction and plasticity which acquired the floor when mixed with lime, adding percentages of lime 0-8 %, in intervals of 2% to soil samples. To then determine the shear strength (CBR).

Present thesis main objective, determining the technical advantages of stabilization of subgrades clay with lime to be used as a base or sub-base for paving streets urbanization San Luis of Abancay.

Following the rules established in the Manual Highway Soils, Geology, Geotechnical and Pavement Ministry of Transport and Communications e ASTM C-25 Laboratory tests for Cal. In which indicate that when the CBR to vary between 6% and 10%, It is recommended that the soil should be replaced or improved, as they are unsuitable soils. So we proceeded to the study of soils in the San Luis Urbanization. Resulting in that the floor of the pit 01 was classified as a Sand Silt - Shale (SC-SM) and soil test pit 02 I was classified as a Silty Sand (SM), yielding relatively low values, the first with a value of CBR of 8.75% and a percentage of 16.75% expansion.

By not meeting the specifications in the above rules, as the first method we decided to use the method Eades & Grim (ASTM D 6276) in order to obtain the percentage of lime needed to stabilize the soil, which consisted of measuring the pH of the soil samples lime-determined percentage of lime in order to determine the effectiveness of stabilization. The result obtained in the pH test, for the first sample indicated that soil requires 3%, for the second sample shows 5% by weight lime is required to achieve their goal. And second method we proceeded to perform the tests in the laboratory in order to obtain the physical characteristics of soil. For this, specimens of 0%, 2%, 4%, 6% and 8% lime were drawn by weight of dry soil, which they are compacted and saturated to then determine the values of shear stress (CBR) for each of the samples. Obtained as a result for the first sample by adding 8% lime one CBR value of 145.00%, for the second sample adding obtained 8% lime one CBR value of 69% was obtained well above the requirements of MTC Manuals.

Finally, when comparing the soil-lime with soil in natural state, it was assumed that its plasticity and expansion percentage was reduced. So the percentage of 8% lime is satisfactory to achieve stabilization of soil analyzed, thus complying with the specifications set out in the manual Technical Specifications MTC.

Keywords: stabilization with lime, stabilization of clay soils, stabilization of silty soils, subgrade improvement.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación pretende demostrar la influencia de la cal en suelos arcillosos, limosos de elevada plasticidad, mejorando las propiedades de la resistencia mecánica (CBR), la plasticidad y la expansión en los suelos de los jirones Molinopata y Santo Domingo de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.

Así, si la subrasante no es la adecuada y no asegura la estabilidad y la durabilidad que garantice el buen comportamiento de la estructura del pavimento se tiene dos opciones, la primera siendo esta la más tradicional, es el de sustituir el suelo actual realizando grandes movimientos de tierra y la segunda opción es la de mejorar las características físicas de la subrasante haciendo uso de cal con el fin de economizar y ser amigable con el medio ambiente.

En la actualidad, la contaminación ambiental causa gran preocupación debido al incremento de esta, ocasionado principalmente por la generación de residuos sólidos urbanos, sumado a esta la generación de materiales provenientes del movimiento de tierras, el mismo que no cuentan en la actualidad con una adecuada disposición.

La finalidad de esta investigación es mejorar las características físico – mecánicas, de los suelos de la subrasante mediante el uso de cal, brindando una base estabilizada el cual formará parte de la estructura de un pavimento.

Las fuentes bibliográficas provienen de libros y publicaciones dedicadas a la mecánica de suelos y normas que establecen los procedimientos de los ensayos de laboratorio correspondientes al tema de investigación, como son el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), normas del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) y las Normas Técnicas Peruanas (NTP).

El presente trabajo de tesis está constituido por cuatro capítulos, todos ellos relacionados con el instructivo general sobre investigación pregrado y post grado, siendo los siguientes:

Capítulo I: En el que se desarrolla el problema de investigación la descripción de la problemática, la identificación y la formulación del problema general y los problemas específicos, la determinación de los objetivos general y específicos de la investigación, así como el desarrollo de la justificación y la viabilidad de la investigación, y finalmente se desarrolla las limitaciones de la investigación.

Capítulo II: En este capítulo, se desarrolla todo lo relacionado al marco teórico, el cual está compuesto por lo siguiente: los antecedentes de la investigación, desarrollo de las bases teóricas, la formulación de las hipótesis, la operacionalización de las variables y finalmente la definición de los términos básicos.

Capítulo III: En este capítulo se desarrolla la metodología el cual está comprendido por lo siguiente: tipo y nivel de la investigación, diseño de la investigación, la determinación de la población, el desarrollo de la técnica e instrumentos de recolección de datos y finalmente las técnicas del procesamiento de los datos, en este último, se desarrolla la exposición y análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio de suelos, también se desarrolla las correlaciones respectivas y la prueba de hipótesis, las conclusiones a las que se ha llegado como resultado la presente investigación y a su vez se desarrolla las recomendaciones y sugerencias para seguir investigando e implementando los trabajos relacionaos con la estabilizaciones de suelos con agentes químicos.

Capítulo IV: En este capítulo se ha desarrollado el aspecto administrativo el cual está conformado por el cronograma de actividades y el presupuesto de la investigación.

En el presente trabajo de investigación también cuenta la descripción de las referencias bibliográficas y anexos, tales como la matriz de consistencia, especificaciones técnicas y componente de ingeniería.

CAPÍTULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Descripción de la realidad problemática.

El distrito de Abancay se encuentra en la parte sureste del país a una altitud de 2,285 msnm en la vertiente oriental de los andes, está ubicada geográficamente a 13°38'14.31" S y 72°52'43.88" E, tiene un clima cálido templado, con una temperatura mínima 4.0°C y de una máxima de 22.5°C. La temporada de lluvias comienza en el mes de noviembre y concluye en el mes de marzo de modo que los procesos constructivos varían en función a dichas temperaturas y épocas, por ello, se requiere de un nivel técnico apropiado para su ejecución.

En la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay, distrito Abancay, existe una uniformidad de suelos. La plataforma de las calles presenta pérdida de los finos, asentamientos o hundimientos notorios que perjudican al tránsito vial, de la misma forma, se observa en la subrasante presencia de fallas transversales, longitudinales y diagonales.

Para ello es necesario determinar la cantidad óptima de cal viva en porcentaje al peso seco del suelo a estabilizar, con la finalidad de mejorar las características físicas – mecánicas del suelo de la subrasante existente, de las diferentes calles de la urbanización San Luis.

Las calles de la Urbanización San Luis se encuentran a nivel de subrasante la cual se encuentra deteriorada y en malas condiciones de transitabilidad, llegando a afectar a la población beneficiaria de esta Urbanización.

1.1.2. Identificación y formulación del problema

1.1.1.1. Problema general

¿Se podrá incrementar la capacidad de soporte (CBR) y reducir la plasticidad del suelo al añadirle cal y que porcentaje es el requerido para lograr dicho objetivo?

1.1.1.2. Problemas específicos

Con la pregunta ya planteada surgen otras interrogantes, que son las siguientes:

¿Cuál es la cantidad de cal necesaria para mejorar la resistencia de la subrasante?

¿Cuál es el incremento porcentual de la plasticidad del suelo de la subrasante estabilizado?

¿Cuáles es el incremento porcentual de la humedad óptima de compactación de la subrasante del suelo estabilizado?

1.1.3. Objetivos de la investigación

1.1.3.1. Objetivo general

Estabilizar el suelo existente de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la urbanización San Luis, adicionando un porcentaje de cal y que este posteriormente pueda ser usado como capa de subrasante de un pavimento según las especificaciones y normas vigentes en nuestro país.

1.1.3.2. Objetivo específico

Para los objetivos específicos se identificaron los siguientes:

- Obtener las muestras necesarias de suelo mediante la exploración de suelos a cielo abierto (calicatas), con la cual se pretende realizar los estudios en el laboratorio de suelos.
- Clasificar los suelos en base a sus características físicas, con la finalidad de determinar el porcentaje de finos y así determinar la cantidad de cal a utilizar.
- Determinar las propiedades físico - mecánicas del suelo ya estabilizado.
- Obtener un porcentaje de cal en base a dos métodos los cuales son el método de Eades & Grim para determinar el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo y porcentaje de cal optimo el cual será obtenido mediante los ensayos de laboratorio.

- Determinar los límites de plasticidad del suelo natural y comparar los resultados con la plasticidad del suelo estabilizado con cal.

1.1.4. Justificación y viabilidad de la investigación

1.1.4.1. Justificación

Las calles de la Urbanización San Luis no cuentan con una adecuada infraestructura vial urbana. Lo cual genera una inadecuada calidad de vida a los pobladores e inadecuada transitabilidad vehicular y peatonal.

Con el presente proyecto de tesis, se pretende dar a conocer el uso de la cal para la estabilización de los suelos arcillosos, limosos y finos, el cual mejora las características naturales de suelo de modo que aumente su capacidad portante, también mejora las características plásticas de los suelos.

Al aumentar el valor de soporte de la subrasante se evitará la remoción del suelo existente y que este sea reemplazado con otro material granular lo cual significaría un costo elevado. Al mejorar la subrasante con el uso de cal, esto ayudará a reducir el espesor de la capa de soporte de los pavimentos.

1.1.4.2. Viabilidad de la Investigación

Esta investigación es importante para proveer de una alternativa que brinde soluciones a los problemas de los suelos con presencia de arcilla y limo, que sea de bajo costo y de fácil aplicación, sin la utilización de equipos sofisticados, pero con toda la calidad requerida en los manuales del MTC. Para que el suelo que conforme la estructura del pavimento pueda tener larga vida.

Al mismo tiempo, es importante dar a conocer que la estabilización de la subrasante con cal, es sumamente fácil de implementar en las calles, caminos vecinales que pasen a ser pavimentados. Esto favorece a las entidades públicas a ejecutar obras viales con un costo inferior al método tradicional que en la actualidad se viene utilizando, contribuyendo así al

desarrollo a través de buenas vías de comunicación y preservando el medio ambiente con proceso constructivo no dañino.

1.1.5. Delimitaciones de la investigación

1.1.5.1. Espacial

Las calles de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay, distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac

1.1.5.2. Temporal

El tiempo de la investigación tomo como punto de partida en el mes de septiembre del 2016 con un período de 03 meses para poder obtener resultados que puedan dar una mejor apreciación de la investigación hecha.

1.1.6. Limitación de la investigación

Las limitaciones que se presentaron durante el desarrollo de la presente tesis son las siguientes:

Solo se realizan algunos ensayos con el equipo disponible en el laboratorio de mecánica de suelos.

CAPÍTULO II

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Antecedentes de la investigación

“La estabilización de suelos arcillosos y limosos con cal en la construcción tiene más de 5,000 años de antigüedad. Las Pirámides de Shersi en el Tíbet fueron construidas con mezclas compactadas de arcilla y cal, en la China y la India a lo largo de la historia, se ha utilizado de varias maneras la estabilización con cal sin embargo, fue en los EE.UU, que a finales de los años 40 cuando se aplicaron a las mezclas de cal y suelo para ser utilizadas para la estabilización química de los suelos, para lo cual se utilizaron técnicas y ensayos de laboratorio de mecánica de suelos para determinar el porcentaje de cal óptimo para incrementar la resistencia del suelo, el tratamiento de arcillas con cal comenzó en los años 50 aumentando su popularidad con gran rapidez. Se han construido miles de kilómetros de carreteras, así como aeropuertos principales como el de Dallas Fort Worth en EE.UU, sobre arcillas estabilizadas.” (HUEZO MALDONADO & ORELLANA MARINEZ , 2009)

“Esta técnica de estabilización de suelos también se practica extensamente en Sudáfrica, Australia, Nueva Zelanda, Alemania, Suecia, Guatemala y Francia. Desde entonces, la estabilización de los suelos arcillosos con cal se ha convertido en una alternativa económicamente beneficiosa a los métodos tradicionales de construcción. Los proyectos típicos que se han beneficiado de la estabilización con cal, incluyen:” (HUEZO MALDONADO & ORELLANA MARINEZ , 2009)

- Autopistas, carreteras principales y secundarias.
- Pistas de aterrizaje y de servicio en aeropuertos.
- Estabilización de laderas.
- Caminos vecinales, pistas forestales y caminos rurales.

- Vías férreas.
- Recuperación de muelles en desuso.
- Recuperación de terrenos contaminados.
- Rellenos estructurales.

En nuestro país, existen diversos proyectos de carreteras en los cuales se ha implementado la estabilización de los suelos con cal, algunos proyectos donde se han empleado esta alternativa son los siguientes:

- “Proyecto denominado “MEJORAMIENTO VIAL DE LA CARRETERA HUÁNUCO –TINGO MARÍA – PUCALLPA SECTOR: AGUAYTÍA – PUCALLPA” el mismo se ejecutó en el año 2001, ubicada en los departamentos de Huánuco y Ucayali, teniendo esta como principal fin la conectividad entre los departamentos Huánuco y Ucayali. Los porcentajes de cal utilizados en la estabilización del suelo que compone la subrasante de la carretera, estuvieron dentro del rango 3.5% a 6%, esto debido a la variación de plasticidad que presentaba el suelo del lugar, la información anterior fue obtenida de la página Web del Ministerio de Transportes y Comunicaciones”. (MTC, PROYECTO , 2001)
- “Proyecto denominado REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA CHONGOYAPE COCHABAMBA – CAJAMARCA TRAMO LLAMA – COCHABAMBA” (MTC, PROYECTO, 2011) ejecutado en el año 2011 ubicada en el departamento de Cajamarca, en este proyecto se ha hecho el uso de la estabilización suelo-cal, por motivos que se ha verificado un pronto agotamiento de suelo aluvial que viene siendo utilizado en capa de subrasante para corregir la plasticidad de materiales excedentes de corte. Frente a esta problemática mediante Resolución Ministerial 878-2011.-MTC/02 se aprueba el

adicional de obra en la que consiste como alternativa de solución el empleo de la tecnología suelo-cal, con la finalidad de mejorar la plasticidad de los materiales que conforman la subrasante. El porcentaje de cal utilizado estuvieron dentro del rango de 4% a 5%.

Asi mismo en el ámbito nacional se cuenta con tesis desarrolladas en otras universidades que abordaron la estabilización química con la finalidad de mejorar las características físico mecánico de la subrasante siendo las siguientes:

- “UTILIZACIÓN DE BOLSAS DE POLIETILENO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELO A NIVEL DE LA SUBRASANTE EN EL JR. AREQUIPA, PROGRESIVA KM 0+000 - KM 0+100, DISTRITO DE ORCOTUNA, CONCEPCIÓN de la Universidad Nacional del Centro del Perú de la ciudad de Huancayo en el 2016.” (UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, 2016)
- “EFECTO DE LA CAL COMO ESTABILIZANTE DE UNA SUBRASANTE DE SUELO ARCILLOSO de la Universidad Nacional de Cajamarca de la ciudad de Cajamarca en el 2014.” (UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, 2014)
- “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS POR MEDIO DE ADITIVOS (Eco Road 2000) PARA PAVIMENTACIÓN EN PALIAN – HUANCAYO – JUNÍN de la Universidad Peruana los Andes de la ciudad de Huancayo en el 2016.” (UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES, 2016)
- “DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE INCORPORANDO CAL ESTRUCTURAL EN EL SUELO LIMO ARCILLOSO DEL SECTOR 14 MOLLEPAMPA DE CAJAMARCA de la

Universidad Privada del Norte de la ciudad de Cajamarca en el 2015.”

(UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, 2015)

- “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA Y/O SUB BASE DE PAVIMENTOS de la Universidad Nacional de Ingeniería de la Ciudad de Lima 2012.” (UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, 2012)
- “GUÍA BÁSICA PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR EN LA PROVINCIA DE SAN ROMÁN de la Universidad Nacional del Altiplano de la ciudad de Puno 2015. “ (UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO, 2015)

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Estabilización de suelos

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizadores, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en ese caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio, cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como sub-base o base granular estabilizada.

Con frecuencia los suelos, no son los más adecuados para ser utilizada en una obra determinada y cuyas características obligan a tomar decisiones las cuales mencionaremos a continuación:

1. Aceptar el material tal como se encuentra, pero teniendo en cuenta en el diseño las restricciones impuestas por su calidad.

2. Eliminar el material insatisfactorio o abstenerse de usarlo, sustituyendo por otro de características adecuadas.
3. Modificar las propiedades del material existente para hacerlo capaz de cumplir en mejor forma los requisitos deseados o, cuando menos, que la calidad obtenida sea adecuada.

2.2.2. Tipos de estabilización de suelos

a) Estabilización por medios mecánicos

Consisten en realizar el proceso de estabilización por compactación, se debe emplear este método en todas aquellas obras donde la materia prima es el suelo. También es frecuente las mezclas de suelos para mejorar las propiedades físicas del suelo.

Con este tipo de estabilización se pretende mejorar el material del suelo existente, sin cambiar la estructura y composición básica del mismo como herramienta para lograr este tipo de estabilización se utiliza la compactación, con la cual se reduce el volumen de vacíos presentes en el suelo.

b) Estabilización por combinación de suelo

La estabilización por combinación de suelo, considera la mezcla de dos o más materiales con la finalidad de obtener un material adecuado, cabe indicar que la combinación de suelos debe tener mayor incidencia los materiales de préstamo (canteras).

c) Estabilización por medios electrónicos

En este tipo de estabilización en los que la electroósmosis y la utilización de pilotes electrometálicos, son probablemente los más conocidos.

d) Estabilización por medios químicos

Este tipo de estabilización es generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos tales, como el cemento, la cal el asfalto u otros agentes químicos.

Teniendo en cuenta la gran variedad de los suelos y la composición de los mismos, es de esperarse que cada método resulte solo aplicable a un número limitado de suelos.

e) Estabilidad volumétrica

Este tipo de estabilización consiste en la expansión y contracción de muchos suelos, originadas por los cambios de humedad, se pueden presentar en forma rápida o acompañado de variaciones estacionales o con la actividad. Por tanto, si las expansiones que se desarrollan debido a un incremento de humedad no se controlan de alguna forma, estas presiones pueden ocasionar graves deformaciones y rupturas en el pavimento, en general, en cualquier obra.

f) Resistencia

La resistencia de los suelos, con algunas excepciones, es en general más baja cuanto mayor es el contenido de humedad.

En el caso de los suelos arcillosos al secarse, alcanzan grandes resistencias teniéndose inclusive la condición más alta de resistencia cuando se calientan a temperaturas muy elevadas.

2.2.3. Definición de la cal

“En un producto resultante de la descomposición de las rocas calizas (CaCO_3) por la acción del calor. Estas rocas calentadas a más de $900\text{ }^\circ\text{C}$ se obtiene el óxido de calcio (CaO), conocido con el nombre de cal, producto sólido de color blanco y peso específico de 3300 Kg/m^3 . La cal reacciona violentamente en contacto con el agua, con desprendimiento de calor que alcanza los $90\text{ }^\circ\text{C}$, realizándose la hidratación obteniéndose una pasta blanca llamada cal hidratada o cal apagada. Se forma entonces hidróxido de calcio o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. En la tabla N°02 se describe las propiedades físicas y químicas de la cal.” (ICG & GERENCIA, 2010, pág. 3)

La cal es uno de los productos con la capacidad de proveer una gran variedad de beneficios, los cuales se mencionan a continuación:

- Secar
- Modificar
- Estabilizar

Tabla 1

Características físicas de la cal

<i>Fórmula</i>	<i>CaO</i>
<i>Color</i>	<i>Blanco</i>
<i>Densidad</i>	<i>3300 Kg/cm³</i>
<i>Estado de agregación</i>	<i>Sólido</i>
<i>Masa molar</i>	<i>56.10 g/mol</i>
<i>Punto de fusión</i>	<i>2927°C</i>
<i>Solubilidad en agua</i>	<i>Reacciona</i>

Fuente: (ICG & GERENCIA, 2010, pág. 3)

Ilustración 1
Moléculas de la cal

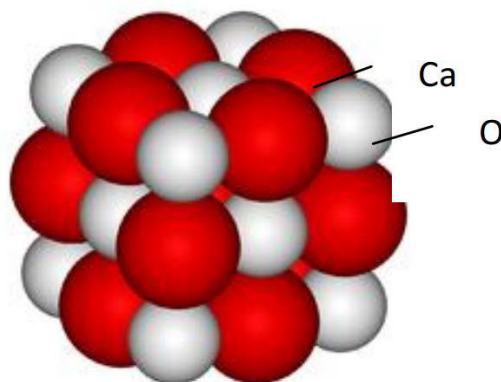


Ilustración 2
Cal



2.2.4. Suelos arcillosos

“Están formados principalmente por arcillas la cual está constituido fundamentalmente por silicatos de aluminio hidratado. Es un tipo de suelo que cuando está húmedo o mojado resulta pegajoso, pero cuando está seco es muy fino y suave dado que la arcilla está formado por partículas diminutas de menos de 0.005 m.m. de diámetro desde un punto de vista de la textura, tiene consistencia plástica y puede ser modelado. Son suelos que para la agricultura se conoce como suelos húmedos y pesados. Son suelos impermeables dado que no dejan pasar el agua o el aire, todo ello propicia que sean suelos donde el agua se estanque con facilidad por lo que en este tipo se necesita realizar un sistema de drenaje adecuado porque, después de las lluvias el agua queda retenida en la superficie. Presenta un color marrón oscuro.” (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA, 2011, pág. 7)

Ilustración 3
Suelo arcilloso



2.2.5. Subrasante

“La subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierra (corte o relleno), sobre el cual se coloca la estructura del pavimento.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018, pág. 21)

2.2.6. California Bearing Ratio (CBR)

“Este método fue propuesto en 1929 por los ingenieros T.E. Stanton y O. J. Porter del departamento de carreteras de California. Desde esa fecha tanto en Europa como en América, el método CBR se ha generalizado y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en la construcción de carretera.”

(UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, C.B.R)

“El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1” ó 0.2” de penetración, expresada en por ciento en su respectivo valor estándar. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, que no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo.”

(UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, C.B.R)

“El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (lbs/pulg²) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (lbs/pulg²) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.” (UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, C.B.R)

Las características físicas del suelo de la subrasante sobre las que se apoyan la estructura del pavimento, están bien definidas de acuerdo a su capacidad de soporte CBR. En las siguientes tablas se muestran valores de CBR de acuerdo a su categoría.

Tabla 2
Categoría de la Subrasante

Categoría de la Subrasante	CBR
S₀ : Subrasantes inadecuada	CBR < 3%
S₁ : Subrasantes insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S₂ : Subrasantes regular	De CBR ≥ 6%

	A CBR < 10%
S₁ : Subrasantes buena	De CBR ≥ 10%
	A CBR < 20%
S₁ : Subrasantes muy buena	De CBR ≥ 20%
	A CBR < 30%
S₁ : Subrasantes excelente	De CBR ≥ 30%
Fuente: (MTC & Manual de Suelos, 2013, pág. 40)	

Tabla 3
Categoría de la Subrasante

Categoría de la Subrasante	CBR
Base	Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante (CBR≥80%) o será tratada con asfalto, cal o cemento.
SubBase	Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular (CBR≥40%) o tratada con asfalto, cal o cemento.
Fuente: (MTC & Manual de Suelos, 2013, pág. 14)	

Tabla 4
Categoría de la subrasante (base)

Categoría de la subrasante	CBR
Vías locales y colectoras	Mínimo 80%
Vías arteriales y expresas	Mínimo 100%

Fuente: (RNE & CE.020, 2016, pág. 18)

Tabla 5
Clasificación del suelos según el CBR

CBR	Clasificación Cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Subrasante

5 – 8	Mala	Subrasante
8 – 20	Regular – buena	Subrasante
20 – 30	Excelente	Subrasante
30 – 60	Buena	Sub base
60 – 80	De buena	Base
80 – 100	Excelente	Base

Fuente: (ASSIS., 1988)

2.2.7. Estabilización de suelos con cal

Los productos estabilizantes más conocidos son la cal, el cemento y el asfalto, cuyos rangos generales de aplicabilidad son muy diversos, es necesario tener muy en cuenta el tipo de suelo para seleccionar el tipo de estabilizante más adecuado, en este caso la calidad de cal a usar para estabilización de suelos arcillosos debe ser estudiado. Para la estabilización de suelos se usan la cal hidratada es la que reacciona con las partículas arcillosas y los modifica o transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante.

La estabilización con cal es un tratamiento que se aplica a los suelos, a los materiales granulares o capas de subrasante, adicionalmente un ligante estabilizador, para mejorar sus características mecánicas, especialmente la capacidad de soporte, resistencia a los agentes atmosféricos, estabilidad volumétrica, etc. Asimismo, al mezclar el suelo con la cal se mejora la condición plástica del mismo y la reducción de permeabilidad.

En la estabilización del suelo cambia considerablemente las características naturales del mismo, produciendo resistencia y estabilidad a largo plazo, en forma permanente, en particular en lo que concierne a la acción del agua. Su aplicación se puede llevar a cabo en vías, caminos rurales, zonas peatonales, aeropuertos, calles urbanas, vías férreas, etc.

Las propiedades mineralógicas de los suelos determinaran su grado de reactividad con la cal y la resistencia final de la capa estabilizada. Es recomendable los suelos arcillosos de grano fino, que pasan más del 25% la malla N° 200 e índice de plasticidad mayor al 15%, los suelos con esas propiedades son apropiadas para la estabilización con cal.

2.2.8. La química del tratamiento con cal

“Cuando la cal y el agua se añaden a un suelo arcilloso, comienzan a ocurrir reacciones químicas casi inmediatamente” (NACIONAL LIME ASSOCIATION, 2004, pág. 8). Estas reacciones químicas se describen a continuación:

2.2.8.1. Secado

“Si se usa cal viva, la misma se hidrata inmediatamente (químicamente se combina con el agua) y libera calor. Los suelos se secan porque el agua presente en el suelo participa en esta reacción, y porque el calor generado puede evaporar la humedad adicional. La cal hidrata producida por estas reacciones iniciales, posteriormente reaccionara subsecuentes, lentamente producirán un secado adicional porque las mismas reducen la humedad mejorando el soporte. Si se utiliza la cal hidratada o la lechada de cal hidratada, en lugar de la cal viva, el secado ocurre solo por cambios químicos del suelo, que producen su capacidad para retener el agua y aumente su estabilidad.”

(NACIONAL LIME ASSOCIATION, 2004, pág. 8)

La cal puede ser utilizada muy eficientemente para el secado de cualquier suelo alto grado de saturación. La cal al entrar en contacto con el agua, genera una reacción exotérmica, provocando calor que evapora el agua del suelo.

El óxido de calcio se hidrata al agregarle agua o por la humedad del suelo. Para hidratar una tonelada de óxido de calcio, se requiere aproximadamente 320 litros de agua.

2.2.8.2. Modificación

“Después de la mezcla inicial, los iones de calcio (Ca^{++}) de la cal hidratada emigran a la superficie de las partículas arcillosas y desplazan el agua y otros iones. El suelo se hace friable y granular, haciendo más fácil para trabajar y compactar. En esta etapa el índice de plasticidad del suelo disminuye drásticamente “Floculación y aglomeración”

generalmente ocurre en el transcurso de horas.” (NACIONAL LIME ASSOCIATION, 2004, pág. 9)

Gracias al intercambio iónico, el suelo arcilloso con la cal esta se modifica, resultando las siguientes variaciones en su característica físicas las cuales se mencionan a continuación:

- Reducción del límite de plasticidad.
- El suelo se hace friable y granular.
- Mejora la estabilidad y compactación.
- Se reduce la expansividad del suelo.

2.2.8.3. Estabilización

“Cuando se añaden las cantidades adecuadas de cal y agua. El pH del suelo aumenta rápidamente arriba de 10.5 lo que permite romper las partículas de arcilla.

Determinación de la cantidad de cal necesaria es parte del proceso de diseño y se estima por pruebas como la Eades & Grim (ASTM D6276). Se liberan la sílice y la alúmina y reaccionan con el calcio de la cal para formar hidratos de calcio-silicatos (CSH) e hidratos de calcio-aluminatos (CAH). CSH y CAH que son productos cementantes similares a aquellos formados en el cemento portland. Ellos forman la matriz que contribuye a la resistencia de las capas del suelo estabilizado con cal.” (NACIONAL LIME ASSOCIATION, 2004, pág. 9)

“Cuando se forma esta matriz, el suelo se transforma en un material arenoso granular, a una capa dura relativamente impermeable, con una capacidad de carga significativa. El proceso se inicia en unas horas, puede continuar durante años, en un sistema diseñado correctamente. La matriz formada es permanente, duradera y significativamente impermeable, produciendo una capa estructural que es tan fuerte como flexible.”

(NACIONAL LIME ASSOCIATION, 2004, pág. 9)

La cal es utilizada para estabilizar y fortalecer las capas tales como la Subbase y bases las cuales forman la estructura del pavimento. Los beneficios que se obtienen con la estabilización con cal son las siguientes:

- Ganancia progresiva de resistencia a la compresión con el tiempo.
- Durabilidad a largo plazo en condiciones adversas.
- Se crea una barrera resistente al agua.
- Reducción del límite de plasticidad.
- Reduce las características de expansión y agrietamientos.

2.2.8.4. Reacción química de la cal con arcillas

La cal reacciona químicamente con las partículas de arcilla alterando la interacción molecular.

Las arcillas sin tratar tienen una estructura molecular similar a algunos polímeros y dan propiedades plásticas. La estructura puede atrapar agua entre sus capas moleculares, causando cambios en la densidad y el volumen. A mayor área superficial de una arcilla, mayor será su capacidad de atraer agua y mayor también será su comportamiento expansivo.

En suelos arcillosos tratados con cal, los átomos de calcio (de la cal) han reemplazado los átomos de sodio e hidrógeno, produciendo un suelo con características muy friables. El intercambio iónico expulsa también las partículas de cal que se hallaban acumuladas en la superficie de la arcilla.

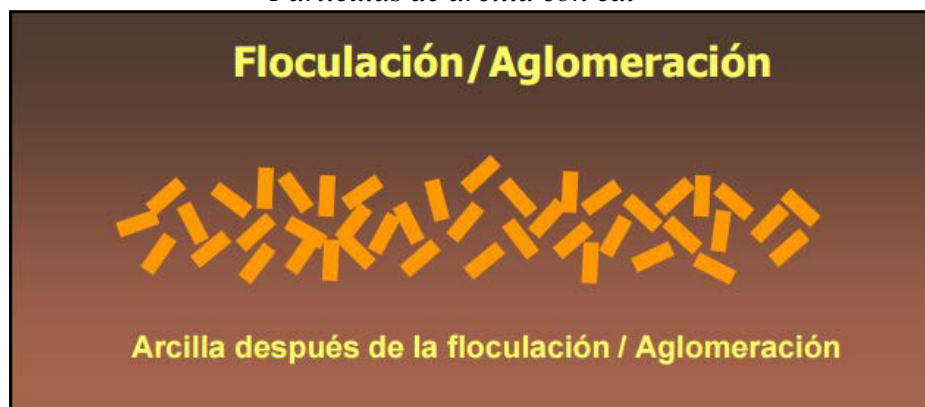
La siguiente reacción ocurre con la sílice y alúmina disponible en suelo, formando un material cementante (el efecto puzolánico), ganando resistencia a la compresión progresivamente.

Floculación: la textura cambia, decrece el índice de plasticidad y se hace trabajable el material tratado.

Ilustración 4
Partículas de arcilla sin cal



Ilustración 5
Partículas de arcilla con cal



Cuando las cantidades de cal y agua son agregadas adecuadamente, el pH del suelo rápidamente incrementa arriba del 10.5, siendo favorable para la formación de hidratos cálcicos de sílice y alúmina. Estos compuestos forman una matriz que contribuye a la resistencia del suelo. A como se forma esta matriz o estructura, el suelo es transformado de su alta expansividad, de un estado natural indeseable a más granular, a un material relativamente impermeable que puede ser compactado en una superficie con una capacidad de soporte de carga. La controlada reacción puzolánica crea un material que es permanente, durable, resistente a los agrietamientos y significativamente impermeable. La capa estructural que se forma es fuerte y flexible.

2.2.9. Influencia de la cal en las características de los suelos

“La cal generalmente produce una disminución en la densidad de los suelos, modifica la plasticidad y aumenta la capacidad soporte y resistencia la corte del material y reduce su

hinchamiento”. (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002) La acción de la cal suele explicarse como efectuada por tres reacciones básicas:

“La primera es la alteración de la partícula de agua que rodea los minerales de arcilla. El segundo proceso es el de coagulación o floculación de las partículas del suelo, dado que la cantidad de cal ordinariamente empleada en las construcciones viales, (del 4% al 10% en peso) resulta una concentración del ion de calcio mayor que la realmente necesaria.”

(GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002)

“El tercer proceso a través del cual la cal afecta al suelo, es su reacción con los componentes del mismo para formar nuevos productos químicos, los dos principales componentes que reaccionan con la cal son la alúmina y la sílice. Esta reacción es prolongada en la acción del tiempo y se manifiesta en una mayor resistencia si las mezclas de suelo-cal son curadas durante determinados lapsos de tiempo” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002). Este hecho es conocido como “acción Puzolánica”.

2.2.10. Influencia de la cal sobre las constantes físicas del suelo

a) Límite líquido - Límite plástico - Índice plástico

“Una de las funciones más importantes de la cal es que modifica la plasticidad del suelo en forma bastante apreciable. Para suelos con índices plásticos inferiores a 15, la cal incrementa el límite líquido en forma que el índice plástico experimenta un ligero incremento. Para suelos más plásticos ($IP > 15$) la cal generalmente reduce el límite líquido y aumenta el límite plástico, traduciéndose en una disminución apreciable del índice plástico.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002)

b) Límite de contracción

La adición de cal flocula las partículas arcillosas del suelo transformando su textura elemental. “La influencia sobre el límite de contracción que experimenta el suelo tratado.

Como corolario de este hecho se observa una marcada reducción de la contracción lineal y de la razón de contracción.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002)

c) Influencia sobre la textura elemental

“Como es natural, el floccular las partículas de arcilla por adición de cal, se produce una modificación de la textura elemental del suelo. Tal hecho es puesto en evidencia en el análisis mecánico por sedimentación, donde se observa una disminución de la fracción de arcilla, aumentando la proporción de partículas de limo y arena fina, esta última en menor medida. “ (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002)

d) Influencia sobre la densidad seca

“Si se compacta una mezcla de suelo-cal se obtiene por lo general una densidad seca menor que el correspondiente al suelo solo, para las mismas condiciones de compactación, esta disminución puede alcanzar hasta un 5%.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002)

La reducción anotada en la densidad puede explicarse por el efecto de la cal sobre la textura del suelo.

“En efecto, el hecho que la adición de cal incrementa la resistencia de un suelo mientras reduce su densidad no debe extrañar. En el caso de un material específico la resistencia generalmente aumenta con la densidad. Sin embargo, cuando un agente químico, tal como la cal, es agregado a un suelo natural se forma un nuevo material, el cual puede tener propiedades físicas y químicas enteramente diferentes que el original, por lo tanto, su propia densidad máxima puede tener mayor resistencia que el suelo no tratado, aunque este se encuentre más densificado.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002)

e) Influencia sobre la resistencia de los suelos

“Si bien la cal disminuye la densidad de compactación del suelo, no ocurre lo mismo con la capacidad resistente del mismo. Por el contrario, la adición de cal produce un

aumento de la resistencia del suelo. Medida por distintos ensayos como veremos a continuación. El inmediato aumento de la resistencia del suelo es causado por los cambios en las partículas que rodean las partículas de arcilla también como una granulación de estas partículas.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002)

“El efecto debido a la acción cementante de la cal, no aparece inmediatamente después de la compactación sino al cabo de cierto tiempo en que tiene lugar la iniciación del fraguado. Los ensayos de valor de soporte de California sobre suelos tratados con cal, muestran un pronunciado aumento de la estabilidad en relación con la del suelo.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002)

2.2.11. Propiedades de la estabilización de suelos con cal

- a) Reducción del índice de plasticidad, debido a una reacción del límite líquido y a un incremento del límite plástico.
- b) Reducción considerable del ligante natural del suelo por aglomeración de partículas.
- c) Obtención de un material más trabajable y fiable como producto de la reducción del contenido de agua en los suelos.
- d) La cal ayuda a secar los suelos húmedos lo que acelera su compactación.
- e) Reducción importante del límite de contracción y el porcentaje de hinchamiento.
- f) Incremento de la resistencia a la compresión simple de la mezcla posterior al tiempo de curado.
- g) Incremento de la capacidad de soporte del suelo (CBR).
- h) Incremento de la resistencia a la tracción del suelo.
- i) Formación de barreras impermeables que impiden la penetración de aguas de lluvia o el ascenso capilar de aguas subterráneas.

2.2.12. Estabilización de la subrasante

La cal estabiliza en forma permanente el suelo fino empleado como la subrasante, creando una capa con un valor estructura significativo en el sistema de pavimento. La estabilización de la subrasante implica una mezcla con cal en el lugar y requiere la adición de cal de 3 a 6% en peso del suelo seco.

Los suelos a tratar en la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay son materiales propios de fundación, que está compuesto de suelos arcillosos donde el tratamiento con cal puede mejorar considerablemente la trabajabilidad y la resistencia a corto plazo del suelo de fundación, de tal forma que la construcción y el mejoramiento de vías urbanas a nivel de carpeta de rodadura puedan ser ejecutados a menor tiempo y a menor costo.

2.2.13. Diseño de la mezcla suelo-cal

Los parámetros que se emplean usualmente para caracterizar los suelos son la granulometría, la plasticidad y la composición química, además del tipo de cal que se añade al suelo para su tratamiento del mismo.

La determinación de la cantidad óptimo de cal para la estabilización de suelos, es el menor porcentaje capaz de modificar las propiedades del suelo de fundación, que sean ventajosas en la parte técnica y económica del proyecto. Los objetivos buscados contemplan por lo general dos casos. Aumentar la resistencia a los esfuerzos normales y tangenciales y reducir el hinchamiento.

Para medir el primer factor, se pueden utilizar los siguientes ensayos como son: Compresión confinada, ensayo triaxial, capacidad de soporte (CBR) y otros. Para evaluar la estabilización a largo plazo se determina la resistencia mecánica a compresión no confinada de las probetas. Además, de ello se debe de seleccionar una fórmula de trabajo que consiste en determinar la dosificación mínima de la cal, indicando el tipo de cal y tasa de cal por metro cuadrado.

2.2.14. Obtención de parámetros

“El diseño de una estabilización con cal debe basarse en las características deseadas en el suelo estabilizado, siendo desde luego indispensable el conocer las características originales de los minerales arcillosos que contenga el suelo ya con base en ellos se puede determinar a priori, las ventajas que se logran con el empleo de la cal.”

(EMPLEO DE CAL EN SUELOS ARCILLOSOS, 2006, pág. 48)

“Son diferentes los criterios para la elección del contenido óptimo de cal, ya que son muy diversos los factores que en ello influyen, destacándose entre otros el contenido de materia orgánica, porcentaje de los diferentes minerales arcillosos presentes en el suelo. Características que se deseen modificar en el suelo, porcentaje de finos y gruesos en el suelo a tratar. Cualquiera sea el procedimiento empleado para el estudio de las estabilizaciones, es conveniente mencionar que existe un punto en el contenido de cal, más allá del cual, la cal prácticamente no produce mejorías notables en el material, al menos a corto plazo. A este punto es a lo que se conoce como “Punto de Fijación” y significa que en este contenido de cal se ha satisfecho la reactividad potencial de los minerales arcillosos, e inclusive de la materia orgánica.” (EMPLEO DE CAL EN SUELOS ARCILLOSOS, 2006, pág. 48)

2.2.15. Obtención de la cal óptimo

En el diseño de suelo – cal, en su determinación óptima del contenido de cal, donde el porcentaje o peso de la cal es con respecto al suelo seco, para la estabilización de la subrasante de las vías de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay, se requiere ensayos físico – mecánicos, de acuerdo a las normas del Manual de Ensayo de Materiales del MTC, son los siguientes:

- Análisis granulométrico (MTC E 107)
- Limite líquido (MTC E 110)

- Índice de plasticidad (MTC E 111)
- Clasificación de suelos
- Equivalente de arena (MTC E 114)
- Proctor modificado (MTC E115)
- Valor relativo de soporte (CBR) (MTC E 132)
- Compresión no confinada de suelos (MTC E 121)

El índice de plasticidad (IP) es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución, cuanto más alto este valor el suelo es más plástico y más débil. La cal reaccionará con suelos con IP mayor a 15 y creará un material con resistencia estructural.

2.2.16. Estabilización con otros agentes químicos

2.2.16.1. Estabilización de suelos con cemento

“La estabilización de suelos con cemento, se inicia desde 1917, cuando AMIES patentó un primer procedimiento de suelos a base de mezclarles proporciones variables de cemento tipo portland; desde entonces se ha popularizado la utilización del suelo – cemento. La acción estabilizadora del cemento consta de varias etapas, la primera de las cuales es la acción de la naturaleza fibrosa del silicato de calcio que se forma cuando los granos del cemento entran en contacto con el agua. Debido a esta reacción se forman masas de fibras minúsculas que se traban fuertemente unas con otras y con otros cuerpos. La solución formada por la mezcla de cemento y agua reacciona con las partículas del suelo, reacción en la que los iones de calcio tienden a agrupar las partículas del suelo cargadas negativamente produciéndose la floculación por acción de la gravedad. Por último, si se compacta la mezcla, se produce una reacción del calcio con la sílice y alúmina de tamaños coloidales produciéndose complejos compuestos de silicatos y aluminatos que aumentan lentamente la resistencia de la mezcla con el

tiempo. A esta reacción se la llama puzolánica.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002, pág. 113)

“La reacción favorable suelo-cemento se ve muy impedida o nulificada cuando el primero contiene materia orgánica, pues los ácidos orgánicos poseen gran avidez por los iones del calcio que libera la reacción original del cemento y los captan, dificultando la reacción aglutinante del propio cemento en los suelos gruesos o la estabilización de las partículas laminares en las arcillas. Por esta razón, las especificaciones de casi todos los países exigen que el contenido de materia orgánica en un suelo no sobrepase 1 a 2% en peso, ha de ser considerado apropiado para ser estabilizado con cemento. Es también nociva la presencia de sulfatos u otras materias ávidas de agua por cuanto privan al cemento de la humedad necesaria para el cumplimiento de sus funciones. Pero salvo estos dos inconvenientes, los demás suelos pueden tratarse con cemento para mejorar su comportamiento mecánico, siendo la principal limitación la dificultad que puede presentarse para obtener un buen mezclado con las arcillas, motivo por el cual, en este caso, algunos recomiendan añadir previamente al suelo una pequeña cantidad de cal que facilite su manejo y pulverización y permita la posterior incorporación del cemento sin dificultad.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002, pág. 113)

2.2.16.2. Estabilización de suelos con asfalto

“La estabilización con productos bituminosos tales como asfaltos líquidos, emulsiones asfálticas y alquitrán. La estabilización con estos productos persigue uno o ambos de los siguientes fines:” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002, pág. 117)

“En suelos no plásticos o arenosos, se trata de que ejerza una acción ligante que unida a la fracción propia del suelo, evite deformaciones de la capa mejorada bajo la acción del tránsito.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002, pág. 117)

“En el país, la estabilización de suelos arenosos en la que existe mayor experiencia. Aunque prácticamente todos los suelos responden a la estabilización con asfalto, los mejores resultados se obtienen con las arenas y las gravas arenosas, materiales a los que el asfalto de cohesión e impermeabilidad. Aunque la granulometría del material por ser estabilizado no es esencial se exige los siguientes requerimientos.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002, pág. 117)

- Tamaño máximo de partícula menor a 1/3 del espesor de la capa compactada.
- Más del 50% del material debe pasar el tamiz de 4.76 mm. y más del 35% de 0.425 mm.
- Entre 10 y 15% debe pasar el tamiz 0.074 mm.
- El límite líquido de la fracción fina no puede ser mayor de 40 ni el índice plástico superior a 18.

2.2.16.3. Estabilización con cloruro de sodio

“La sal como estabilizante es apropiada en todos los suelos, salvo aquellos que contienen materia orgánica. La sal puede agregarse al suelo seco, en cristales o en forma de salmuera y produce una capa con superficie lisa y uniforme. Aunque no se conoce completamente el mecanismo por medio del cual se produce la estabilización, se cree que se producen reacciones, coloidales a través de las cuales el ion sodio del aditivo desplaza los iones naturales de los materiales arcillosos del suelo. La principal desventaja que se presenta es la solubilidad de la sal, lo que hace que pueda ser fácilmente lavada por el agua de percolación, lo que se traduce en una escasa durabilidad en la capa estabilizada. Un estudio realizado con una arcilla de baja compresibilidad de Manaure (Guajira) indicó que la adición de sal produce modificaciones de escasa importancia en los límites líquido y plástico, aumentos en la humedad óptima de compactación y disminución de la densidad

máxima y, curiosamente, en la resistencia a la compresión no confinada.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002, pág. 121)

2.2.16.4. Estabilización con cloruro de calcio

Este producto trabaja de forma similar a la sal común, pero es preferible debido al efecto oxidante que tiene el cloruro de calcio. En todo caso, el cloruro de calcio ayuda al proceso de compactación y contribuye con la resistencia del suelo, previene el desmoronamiento de la superficie y es un paliativo del polvo.

Las características higroscópicas de este producto ayudan a mantener la humedad en la superficie del camino.

Se puede utilizar en dos formas:

- En granos regulares o tipo I.
- En hojuelas o pelotillas o tipo II.

La dosificación es de 1 a 2% de cloruro de calcio en peso respecto del suelo seco. El mezclado, compactación y terminación son similares a los de la estabilización con cloruro de sodio; generalmente se aplica disuelto en agua mediante riego al comienzo de la temporada seca.

2.2.16.5. Estabilización con polímeros y resinas

“Las resinas sintéticas empleadas para la fabricación de plásticos y las naturales como el Vinsol pueden utilizarse como impermeabilizantes de suelos en cantidades relativamente pequeñas (1 a 2%) porque, para contenidos mayores, la absorción de agua, medida por cualquier ensayo, aumenta. Las resinas no producen en los suelos aumentos de resistencia de ninguna consideración y actúan solamente sobre suelos ácidos. Tienen, además como desventajas, el elevado costo, su degradación por parte de los microorganismos del suelo y la dificultad práctica que presenta su mezcla con el suelo en tan pequeñas cantidades.” (GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR, 2002, pág. 121)

2.3. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

2.3.1. Hipótesis general

El suelo de la Urbanización San Luis Baja, inicialmente no reúne las condiciones para ser utilizado como subrasante, para ser utilizada como una estructura de un pavimento de acuerdo a las especificaciones técnicas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), resulta adecuado una vez que se estabiliza adicionando un porcentaje óptimo de cal.

2.3.2. Hipótesis específicos

La incorporación de la cal con el suelo de la subrasante aumentar la capacidad portante (CBR) del suelo siendo esta superior al suelo natural.

Existe una dosificación de cal para el incremento de la capacidad portante (CBR) de la subrasante del suelo de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la urbanización san Luis de la ciudad de Abancay.

El uso de la cal disminuye el índice de plasticidad del suelo en los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.

El uso de la cal aumenta la densidad seca máxima del suelo en los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.

2.4. OPERACIÓN DE VARIABLES

2.4.1. Variable independiente

Estado situacional de la subrasante, de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.

Indicadores:

- Contenido de humedad óptima.
- Granulometría del suelo.
- Compactación.

- Cal.

2.4.2. Variable dependiente

Incremento de la resistencia de la subrasante, al añadirle cal en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay

Indicadores

- Incremento de la capacidad portante (CBR).

2.5. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

“Cal: La cal (también llamada cal viva) es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de calcio (CaO). Se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas o dolomías.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Afirmado: Capa compactada de material granular natural o procesado con gradación específica que soporta directamente las cargas y esfuerzos del tránsito. Debe poseer la cantidad apropiada de material fino cohesivo que permita mantener aglutinadas las partículas. Funciona como superficie de rodadura en carreteras y trochas carrozables.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Aglomerante: Material capaz de unir partículas de material inerte por efectos físicos o transformaciones químicas o ambas.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Ahuellamiento: Surcos o huellas que se presentan en la superficie de rodadura de una carretera pavimentada o no pavimentada y que son el resultado de la consolidación o movimiento lateral de los materiales por efectos del tránsito.” (MTC & MTC;

TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Altitud: Altura o distancia vertical de un punto superficial del terreno respecto al nivel del mar. Generalmente se identifica con la sigla “msnm” (metros sobre el nivel del mar).” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Análisis granulométrico o mecánico: Procedimiento para determinar la granulometría de un material o la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Arcillas: Partículas finas con tamaño de grano menor a 2 μm (0.002 mm) provenientes de la alteración física y química de rocas y minerales.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Bache: Depresión que se forma en la superficie de rodadura producto del desgaste originado por el tránsito vehicular y la desintegración localizada.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Limos: Partículas de roca o minerales cuyas dimensiones están entre 0.02 y 0.002 mm.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Base: Capa de material selecto y procesado que se coloca entre la parte superior de una subbase o de la subrasante y la capa de rodadura. Esta capa puede ser también de mezcla asfáltica o con tratamientos según diseños. La base es parte de la estructura de un pavimento.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE

TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“CBR (California Bearing Ratio): Valor relativo de soporte de un suelo o material, que se mide por la penetración de una fuerza dentro de una masa de suelo.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Cemento Portland: Es un producto obtenido por la pulverización del Clinker portland con la adición eventual de yeso natural.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Compactación: Proceso manual o mecánico que tiende a reducir el volumen total de vacíos de suelos, mezclas bituminosas, morteros y concretos frescos de cemento Portland.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“(MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

Contenido de humedad óptimo: Es el contenido de humedad al cual un suelo o material granular al ser compactado utilizando un esfuerzo especificado proporciona una máxima densidad seca. El esfuerzo puede ser estándar o modificado.”

“Contenido de humedad: Volumen de agua de un material determinado bajo ciertas condiciones y expresado como porcentaje de la masa del elemento húmedo, es decir, la masa original incluyendo la sustancia seca y cualquier humedad presente.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Contracción: Esfuerzo volumétrico asociado con un decrecimiento en sus dimensiones.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Curva de compactación (curva de Proctor): Representación gráfica que relaciona el peso unitario seco (densidad) y el contenido de agua del suelo para un determinado esfuerzo de compactación.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Curva granulométrica: Representación gráfica de la granulometría y proporciona una visión objetiva de la distribución de tamaños del suelo. Se obtiene llevando en abscisas los logaritmos de las aberturas de los tamices y en las ordenadas los porcentajes que pasan o sus complementos a 100, que son los retenidos acumulados.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Densidad: Relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Ensayo de compresión: Ensayo para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Estudios básicos de ingeniería: Documento técnico que forma parte del estudio definitivo y contiene como mínimo lo siguiente: tráfico, topografía, suelos, canteras y fuentes de agua, hidrología y drenaje, geología y geotecnia.” (MTC & MTC; TÉRMINOS,

GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN
PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Estudio de suelos: Documento técnico que engloba el conjunto de exploraciones e investigaciones de campo, ensayos de laboratorio y análisis de gabinete que tiene por objeto estudiar el comportamiento de los suelos y sus respuestas ante las sollicitaciones de carga.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Flujo de tránsito: Movimiento de vehículos que se desplazan por una sección dada de una vía, en un tiempo determinado.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Granulometría: Representa la distribución de los tamaños que posee el agregado mediante el tamizado según especificaciones técnicas.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Levantamiento topográfico: Conjunto de operaciones de medidas efectuadas en el terreno para obtener los elementos necesarios y elaborar su representación gráfica” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Límite líquido: Contenido de agua del suelo entre el estado plástico y el líquido de un suelo.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Límite plástico: Contenido de agua de un suelo entre el estado plástico y el semisólido.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Napa freática: Nivel superior del agua subterránea en el momento de la exploración. El nivel se puede dar respecto a la superficie del terreno o a una cota de referencia.” (MTC & Manual de Suelos, Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2013)

“Pavimento flexible: Constituido con materiales bituminosos como aglomerantes, agregados y de ser el caso aditivos.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Pavimento rígido: Constituido por cemento Portland como aglomerante, agregados y de ser el caso aditivos.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“pH: Medida del estado de acidez o basicidad de una solución. Los valores extremos del pH son 0 y 14; y el valor medio 7 indica que la solución es neutra.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Plano topográfico: Representación gráfica pormenorizada a escala de una extensión de terreno.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Rasante: Nivel terminado de la superficie de rodadura. La línea de rasante se ubica en el eje de la vía.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“Subbase: Capa que forma parte de la estructura de un pavimento que se encuentra inmediatamente por debajo de la capa de Base.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO

DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“**Subrasante:** Superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte o relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“**Suelo arcilloso:** Conformado por arcillas o con predominancia de éstas. Por lo general, no es adecuado para el tránsito vehicular.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“**Transitabilidad:** Nivel de servicio de la infraestructura vial que asegura un estado tal de la misma que permite un flujo vehicular regular durante un determinado periodo.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“**AASHTO:** Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials).” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“**ASTM:** Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (American Society for Testing Materials).” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“**MTC:** Ministerio de Transportes y Comunicaciones.” (MTC & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

“RNE: Reglamento Nacional de Edificaciones.” (MTC & MTC; TÉRMINOS,
GLOSARIO DE, GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN
PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, 2018)

CAPÍTULO III:

3.1. METODOLOGÍA

3.1.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo exploratoria es considerada como el primer acercamiento científico a un problema. Se utiliza cuando este aún no ha sido abordado o no ha sido suficientemente estudiado y las condiciones existentes no son aún determinantes.

3.1.1.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno.

El tipo de nivel de la investigación es: exploratoria de nivel analítica

3.1.2. Diseño de investigación

El diseño de la investigación aplicativo en el presente tesis será el tipo de diseños experimentales, investigación experimental transversal descriptiva donde se recolectan datos en un solo tiempo y su propósito es describir y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado y abarca las arterias y/o avenidas de la Urbanización San Luis. Los diseños a seguir una vez que se obtenga los datos de campo como son la extracción de muestras de las calicatas, el levantamiento topográfico de la zona, etc. Obtenido estos datos se procederá a realizar los ensayos en el laboratorio de suelos con la finalidad de obtener el porcentaje óptimo de cal, para la estabilización del suelo de la subrasante.

3.1.3. Población y muestra de la investigación población

3.1.3.1. Población

Es cualquier conjunto de unidades o elementos como personas, municipios, empresas, etc. claramente definido para el cual se calculan las estimaciones o se busca la información. Como es imposible obtener datos de toda la población es conveniente extraer

una muestra, que sea representativa (HERNÁNDEZ SAMPIERI, ROBERTO, FERNÁNDEZ COLLADO, & BAPTISTA LUCIO, 2006, pág. 65)

Para esta investigación la población será la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay de La Provincia de Abancay.

3.1.3.2. Muestra

Es el conjunto de operaciones que se realizan para estudiar la distribución de determinados caracteres en la totalidad de una población universo o colectivo partiendo de la observación de una fracción de la población considerada (ÁVILA BARAY, HECTOR LUIS, 2006, pág. 115)

La muestra en el presente trabajo de investigación de tesis realizado es Subrasante de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.

3.1.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.1.4.1. Técnicas

Para esta investigación se hecho del uso de técnicas como de recolección de datos.

- Hojas de datos o cualquier sistema de almacenamiento de información en campo que permita registrar: fecha, ubicación, componente, sección, tamaño de la unidad de muestra y nombre del encargado de la inspección.
- Imágenes fotográficas.
- Planos.
- Ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.

3.1.4.2. Instrumentos

- Cinta métrica de 50 metros.
- Personal para la extracción de las muestras de suelos.

- Manual de Ensayos de Materiales para Carreteras – MTC con los formatos correspondientes y en cantidad suficiente para el desarrollo de la actividad.
- Equipos topográficos.
- Equipos de laboratorio de suelos.

3.1.5. Técnicas y procesamiento de datos

3.1.5.1. Metodología

La metodología es una herramienta para llevar un orden del proceso de la investigación, con el fin de facilitar su desarrollo.

En este proyecto de tesis tiene la finalidad de brindar una solución al problema que se ha mantenido constante en las subrasantes de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay. La resistencia del material existente en la zona, muchas veces no llegar a tener la resistencia requerida (CBR) según la normativa vigente. Una de las soluciones más adecuadas para cuando el material no cumple con las especificaciones para ser utilizada como una base o sub base es la estabilización del suelo con cal, la estabilización del suelo con óxido de calcio (cal) es con la finalidad de mejorar sus características físico-mecánicas incrementando la resistencia y reducir la plasticidad del suelo existente en la subrasante mediante la incorporación de cal, siendo esta solución en la que se enfocó este proyecto de tesis.

3.1.5.2. Descripción del tramo de prueba

El tramo de prueba que sirve de estudio para el desarrollo de este trabajo de tesis y para el cual se diseña la proporción de mezcla suelo-cal está ubicado en la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay, en la provincia de Abancay, departamento de Apurímac.

3.1.5.3. Ubicación del área en estudio:

Departamento : Apurímac

Provincia : Abancay

Distrito : Abancay

Localidad : Urbanización San Luis



Imagen 1: Ubicación del tramo en estudio

3.1.5.4. Localización de las muertas extraídas

Se realizaron un total de 02 muestreos alterados en distintos sectores de la urbanización San Luis, tal como se muestra en la siguiente imagen



Imagen 2: Ubicación de las calicatas

3.2. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS

3.2.1. Muestreo de suelo (MTC E101-2000)

El procedimiento de muestreo consistió en realizar cuatro excavaciones a 80 cm de profundidad con la finalidad apreciar el perfil estratigráfico del suelo y así mismo evitar que el material no contenga material orgánico, tal como se aprecia en las siguientes imágenes. El material extraído se colocó en sacos de 50 kg, posteriormente se trasladó al laboratorio Geotest en la ciudad de cusco para ser analizado y realizar los respectivos ensayos de laboratorio, con el fin de conocer sus características físicas del suelo. Cabe indicar que cada una de las muestras extraídas fue etiquetada indicando la profundidad, la ubicación de las mismas y la fecha de extracción, para posteriormente identificarlo en el laboratorio. A continuación, se muestran las imágenes de las calicatas en la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.



Imagen 3: Extracción de la muestra en el progresiva 0+250 Av. Molinopata



Imagen 4: Vista panorámica de la Calicata 01



Imagen 5: Vista de la estratigrafía de la Calicata 01



Imagen 6: Extracción de la muestra en el progresiva 0+550 Av. Santo Domingo



Imagen 7: vista de la estratigrafía de la muestra 02

El muestreo consiste en obtener al menos tres proporciones mediante el cuarteo de suelo de cada una de las muestras extraídas de las calicatas, aproximadamente para luego seleccionar al azar una de las muestras cuarteadas. El tamaño de la muestra va depender de los ensayos que se vayan a efectuar y del porcentaje de las partículas gruesas de las

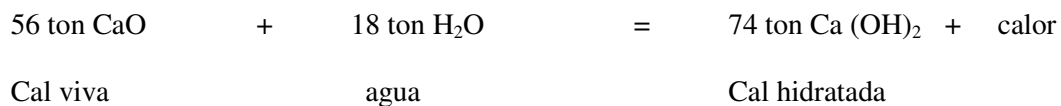
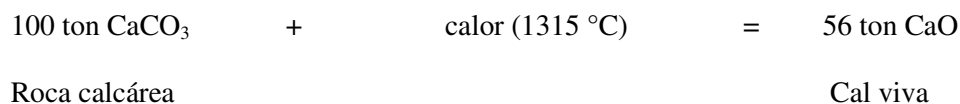
muestras. A continuación, se indican la cantidad aproximada de muestra para cada una de las muestras:

- Análisis granulométrico y constantes de suelos no granulares 2.50 kilos
- Ensayo de compactación 20 kilos
- Ensayo de CBR 25 kilos

3.2.2. Calidad de cal

La Cal viva a ser utilizada en los ensayos del presente proyecto de tesis son de procedencia de fabricación industrial de la ciudad de Lima, esta cal cumple con dos calidades que son disponibles para el tratamiento de suelos: la cal viva y la cal hidratada.

El proceso de producción de la cal es el siguiente:



La cal viva es un producto más activo respecto a la cal hidratada, la cal viva no contiene agua. Una cantidad de 56 toneladas de cal viva es equivalente (mismo contenido en calcio) a 74 ton de cal hidratada. En consecuencia, la cal viva es 32% más activa de la cal hidratada y más conveniente económicamente: 3% en peso de cal viva son equivalentes a 4% en peso de cal hidratada.

La cal viva es un excelente producto en tratamiento de suelos cuando el suelo es muy húmedo: cuando la cal viva se mezcla con el suelo húmedo, absorbe humedad para hidratarse (produciendo cal hidratada). Además, el proceso de hidratación es exotérmico y el calor originado contribuye en el desecamiento ulterior del suelo.

3.3. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO – MECÁNICAS DEL SUELO EXISTENTE EN LA SUBRASANTE DE LA URBANIZACIÓN SAN LUIS DE LA CIUDAD DE ABANCAY

3.3.1. Ensayos de laboratorio al suelo natural

Una vez obtenido las muestras de suelo y llevarlas al laboratorio se inició los ensayos de laboratorio con la finalidad de determinar sus propiedades físicas en relación a la estabilidad y capacidad portante de la subrasante.

A continuación, se indican la descripción de los ensayos de laboratorio que se realizaron para determinar la clasificación de los suelos de acuerdo a la granulometría y límites de consistencia mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

a) Determinación de contenido de humedad

Es un ensayo que permite determinar la cantidad de agua presente en una cantidad dada de suelo en términos de su peso en seco. A continuación, se indica los resultados obtenidos.

Tabla 6
Contenido de humedad

Muestra	Nº	Profundidad (m)	H %
1	C – 01	0.80	9.44
2	C – 02	0.80	12.36

Fuente: Resultados del Laboratorio (Elaboración propia)

b) Análisis granulométrico

Es una prueba para determinar cuantitativamente la distribución de los diferentes tamaños de partículas de suelo. El método utilizado para determinar la granulometría de las muestras es el método mecánico. A continuación, se indica los resultados obtenidos.

Tabla 7
Ensayo de granulometría

Muestra	N°	Profundidad (m)	Porcentaje Retenido en Cada Tamiz							Cazuela
			N° 4 (4.75 mm)	N° 8 (2.38 mm)	N° 16 (1.19 mm)	N° 30 (0.59 mm)	N° 50 (0.30 mm)	N° 100 (0.15 mm)	N° 200 (0.075 mm)	
1	C – 01	0.80	2.50	7.87	8.78	10.22	9.35	6.29	3.66	42.16
2	C – 02	0.80	2.12	8.35	8.78	9.77	7.65	5.28	3.22	31.04

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

Tabla 8
Coefficientes de curvatura y uniformidad

Muestra	N°	Coefficiente de Curvatura	Coefficiente de Uniformidad
1	C – 01	0.18	19.59
2	C – 02	0.11	49.72

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

c) *Determinación del límite plástico*

El límite plástico se define como la mínima cantidad de humedad con la cual el suelo se vuelve a la condición de plasticidad. En este estado, el suelo puede ser deformado rápidamente o moldeado sin recuperación elástica, cambio de volumen, agrietamiento o desmoronamiento.

d) *Determinación del límite líquido*

El límite líquido es el mayor contenido de humedad que puede tener el suelo sin pasar del estado plástico al líquido. El estado líquido se define como la condición en la que la resistencia al corte del suelo es tan baja que un ligero esfuerzo lo hace fluir.

e) *Índice plástico*

El cálculo del índice plástico es la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico, e indica el grado de contenido de humedad en el cual un suelo permanece en estado plástico antes de cambiar al estado líquido.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de límite líquido, Límite plástico e índice plástico.

Tabla 9
Límites de consistencia

Muestra	N°	Profundidad (m)	LL	LP	IP
1	C – 01	0.80	22.66	21.64	1.02
2	C – 02	0.80	24.27	19.96	4.31

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

f) Ensayo de Compactación de suelo

Se entiende por compactación todo proceso que aumenta el peso volumétrico de un suelo. En general, es conveniente compactar un suelo para incrementar su resistencia al esfuerzo cortante, reducir su compresibilidad y hacerlo más impermeable. Para la presente tesis, se realizó el ensayo en el proctor modificado.

Para efectos del control de la compactación durante la construcción, es necesario efectuar pruebas que permitan conocer la máxima densidad y el óptimo contenido de humedad del suelo.

g) Máxima densidad

Es el máximo peso seco, obtenido cuando el material se mezcla con diferentes porcentajes de agua y se compacta de una manera normal pre establecida.

h) Optimo contenido de humedad

Es el porcentaje de agua con el cual se obtiene la máxima densidad para el esfuerzo de compactación específico.

Tabla 10
Densidad máxima

Muestra	N°	Profundidad (m)	Máxima Densidad	% H Optimo
1	C – 01	0.80	2.15	8.00
2	C – 02	0.80	1.95	8.50

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

i) Determinación de la resistencia del suelo (CBR)

Es una medida de la resistencia la esfuerzo cortante del suelo, bajo condiciones de densidad y humedad cuidadosamente controladas. El CBR se expresa en porcentaje como, la razón de la carga unitaria que se requiere para introducir un pistón dentro del suelo, a la carga unitaria que se requiere para introducir el mismo pistón a la misma profundidad en una muestra tipo de piedra partida. Los resultados de los ensayos realizados, de cada una de las muestras el cual se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 11
CBR

Mues tra	Nº	Profundidad (m)	Densidad seca máxima (gr/cm³)	CBR de Diseño
1	C – 01	0.80	2.15	8.75
2	C – 02	0.80	1.95	16.75

Fuente: Resultados del laboratorio. (Elaboración propia)

Luego de determinar que los valores de CBR, estos no cumplen con las especificaciones del Ministerio de Transporte de Comunicaciones y del Reglamento Nacional de Edificaciones para ser utilizada como Base o Sub Base para formar parte de la estructura de diversos tipos de pavimentos o superficie de rodadura de una vía.

3.3.2. Ensayos para la determinar el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo y porcentaje de cal óptimo.

3.3.2.1. Primer método el Ensayo de eades & grim (ASTM D-6276)

Este ensayo consiste en determinar el porcentaje de cal necesario para la estabilización del suelo, que requiere el suelo para mejorar sus características físico-mecánica. Haciendo uso de la prueba de Eades & Grim. El cual se escribe a continuación:

Preparación de las muestras para realizar el ensayo de eades & grim (astm d-6276)

Antes de realizar las pruebas del suelo estabilizado con cal, fue necesario preparar el material con el porcentaje deseada de cal. Para ello, se detalla cada uno de los pasos realizados para el presente ensayo los cuales se menciona a continuación:

1. Se obtuvo una muestra de suelo a ser estabilizado.
2. Secar la muestra al horno.
3. Se obtuvo una muestra de 350 gr del suelo que pase la malla N° 40 (0.425 milímetros).
4. Mezclar el suelo con óxido de calcio, en frascos de plástico en una cantidad de 25 gr de suelos y dosificar la cal en peso para un rango de 0% al 8%. Cada porcentaje tendrá su propia muestra, por lo tanto, se necesitan un total de 4 frascos para cada una de las muestras.
5. Agregar 100 ml de agua por muestra.
6. Mezclar las muestras de suelo + óxido de calcio + agua durante 30 seg. cada 10 minutos durante una hora.
7. Con el potenciómetro, obtener los valores de pH de la mezclas.
8. Finalmente, cuando el valor del pH de la mezcla de suelo + óxido de calcio + agua se aproxime a 12.4 esta nos indica la cantidad de óxido de calcio necesaria para estabilizar el suelo a tratar.

Luego del ensayo descrito líneas arriba, se obtuvieron los siguientes resultados los cuales se muestra en el siguiente gráfico:

Tabla 12
Ensayo de EADES & GRIM

Prueba de pH		
% de Cal	Muestra 01	Muestra 02
0%	11.00	11.20
2%	12.20	12.00
4%	12.50	12.30
6%	12.70	12.50
8%	12.90	12.80

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

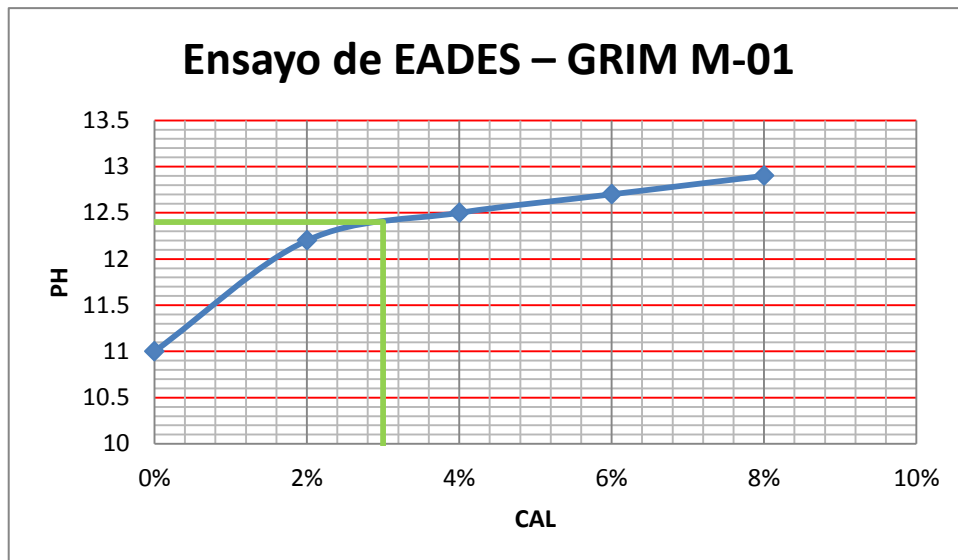


Imagen 8: % de cal mediante el ensayo de EADES & GRIM Muestra 01
Del gráfico, se obtiene que para la muestra 01, cuando el pH de 12.4 el porcentaje óptimo de cal hidratada acuerdo al ensayo de EADES & GRIM es de 3.00%.

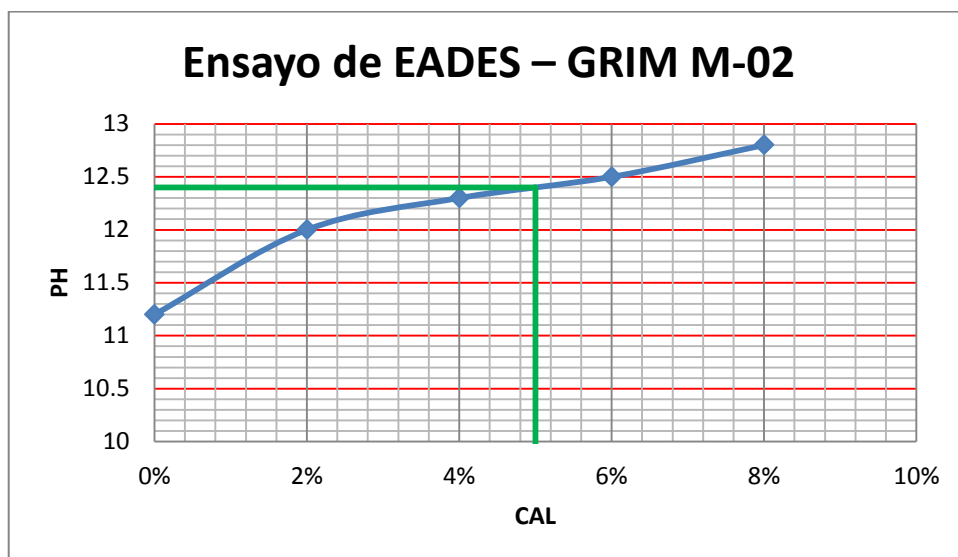


Imagen 9: % de cal mediante el ensayo de EADES & GRIM Muestra 02
Del gráfico, se obtiene que para la muestra 02, cuando el pH de 12.4 el porcentaje óptimo de cal hidratada acuerdo al ensayo de EADES & GRIM es de 5.00%.

3.3.2.2. *Segundo método obtención del porcentaje de cal óptimo mediante los ensayos de laboratorio*

El segundo método consiste en determinar el porcentaje óptimo de cal, ideal que requiere el suelo para mejorar sus características físico-mecánica. Para lo cual, se ha realizado los siguientes ensayos en el laboratorio, obteniéndose los siguientes resultados.

1. Ensayos de contenido de humedad

Tabla 13
Ensayos de % de humedad suelo estabilizado

Muestra	N°	Profundidad (m)	H %			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	6.03	8.53	6.88	6.51
2	C – 02	0.80	6.77	4.19	3.50	3.33

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

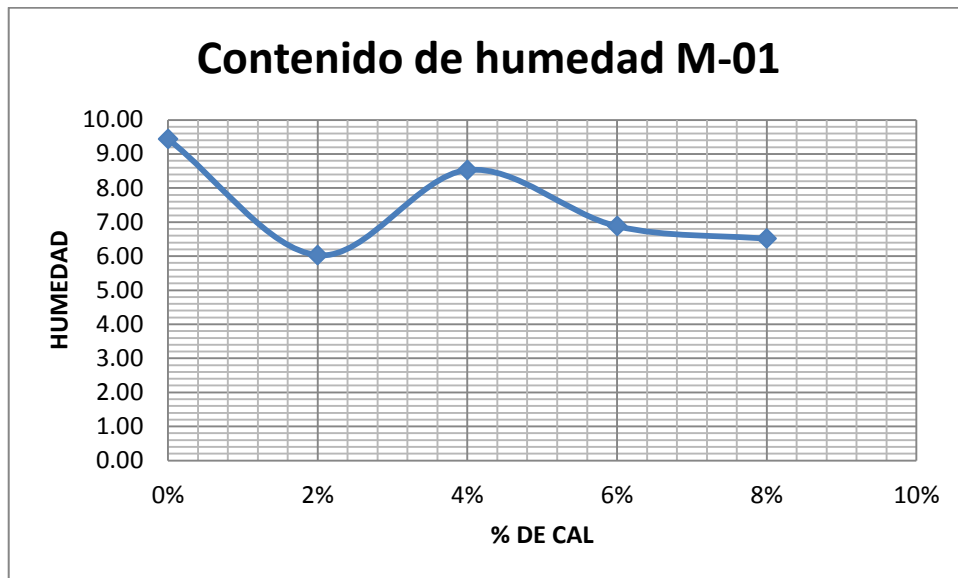


Imagen 10: Gráfico del contenido de humedad de suelo estabilizado M-01.

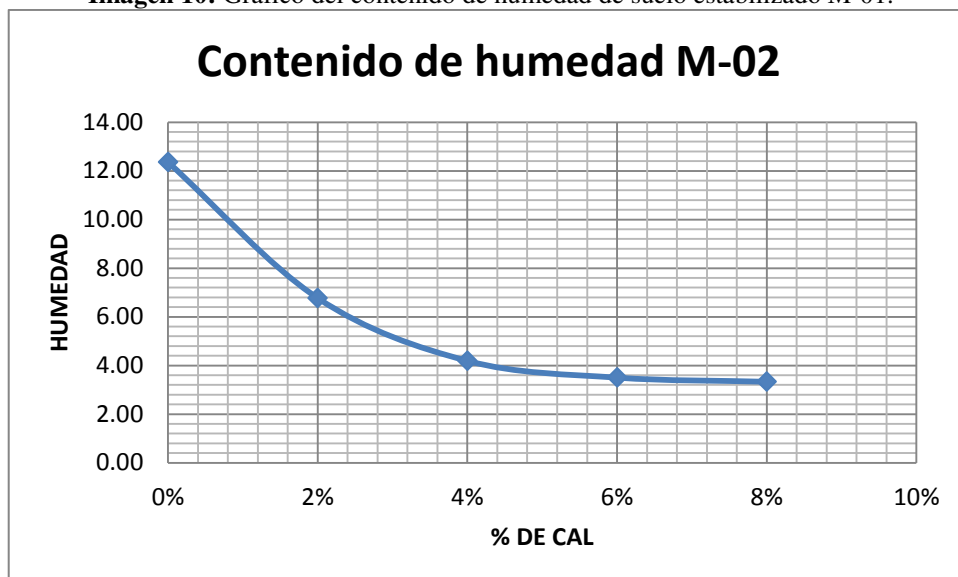


Imagen 11: Gráfico del contenido de humedad de suelo estabilizado M-02.



Imagen 12: Ensayo de contenido de humedad suelo estabilizado.



Imagen 13: Ensayo de contenido de humedad suelo estabilizado.

2. Límites de atterberg

Se realizaron los ensayos de límite líquido y límite plástico, con la finalidad de determinar el cambio en la plasticidad del suelo al añadirle un porcentaje de 2%, 4%, 6% y 8%. Para comparar con la plasticidad del suelo sin cal.

a) Límite líquido

Tabla 14
Límite líquido de suelo estabilizado

Muestra	N°	Profundidad (m)	Límite Líquido			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	42.51	31.31	28.82	30.56
2	C – 02	0.80	27.93	21.69	35.01	34.96

Fuente: Resultados del laboratorio.

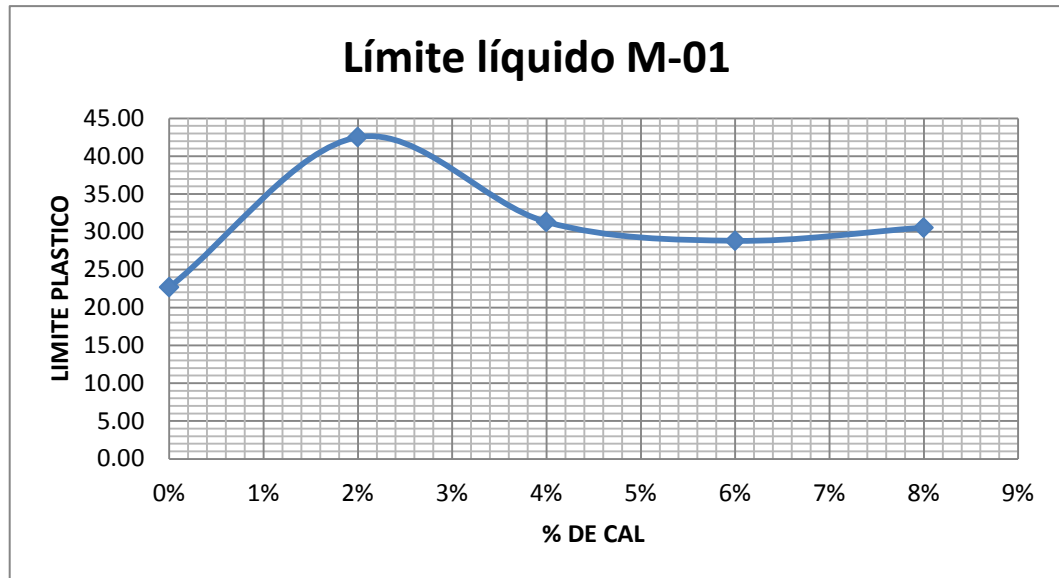


Imagen 14: Gráfico del límite líquido suelo estabilizado M-01.

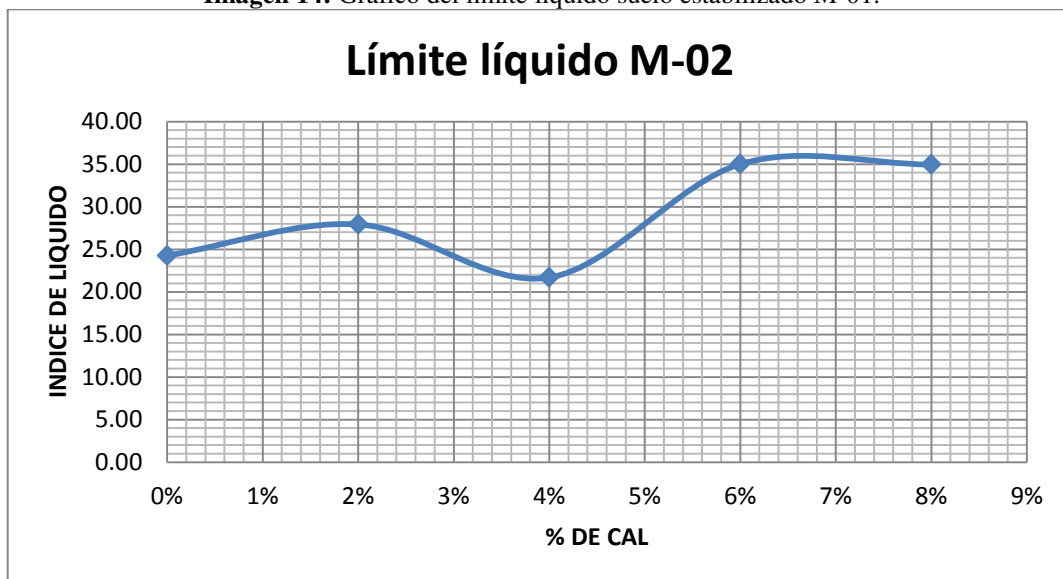


Imagen 15: Gráfico del límite líquido suelo estabilizado M-02.



Imagen 16: Ensayo de límite líquido de suelo estabilizado.



Imagen 17: Ensayo de límite líquido de suelo estabilizado.

b) Límite plástico

Tabla 15
Límite plástico de suelo estabilizado

Muestra	N°	Profundidad (m)	Límite plástico			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	28.71	23.77	24.04	23.24
2	C – 02	0.80	26.64	21.25	30.63	30.61

Fuente: Resultados del Laboratorio (Elaboración propia)

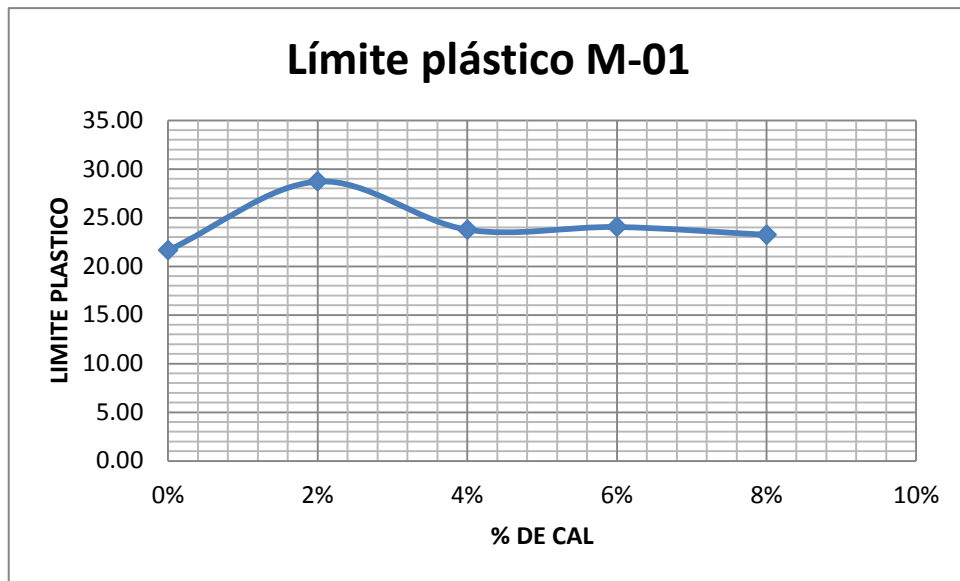


Imagen 18: Gráfico del límite plástico de suelo estabilizado M-01.

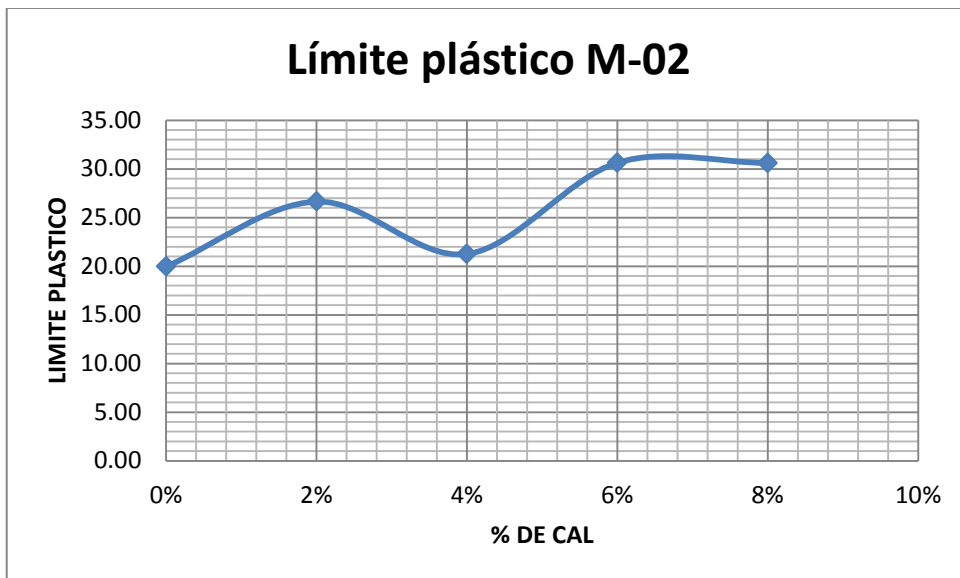


Imagen 19: Gráfico del límite plástico de suelo estabilizado M-02.



Imagen 20: Ensayo de límite plástico de suelo estabilizado.



Imagen 21: Ensayo de límite plástico de suelo estabilizado.

c) Índice de plasticidad

Tabla 16
Índice de plasticidad de suelo estabilizado

Muestra	N°	Profundidad (m)	Índice de plasticidad			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	13.80	7.54	4.78	7.32
2	C – 02	0.80	1.29	0.44	4.38	4.35

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

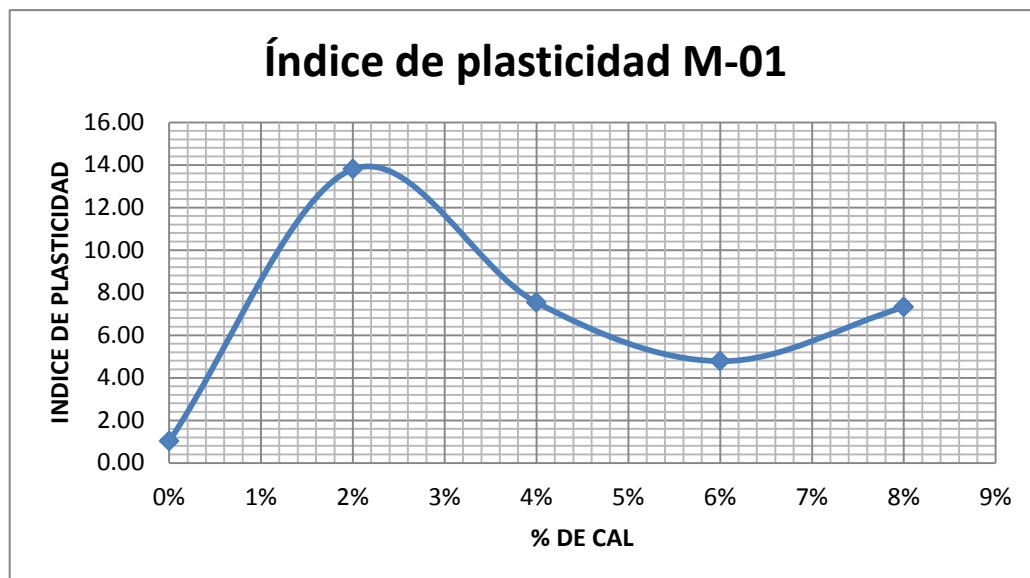


Imagen 22: Gráfico del índice de plasticidad suelo estabilizado M-01.

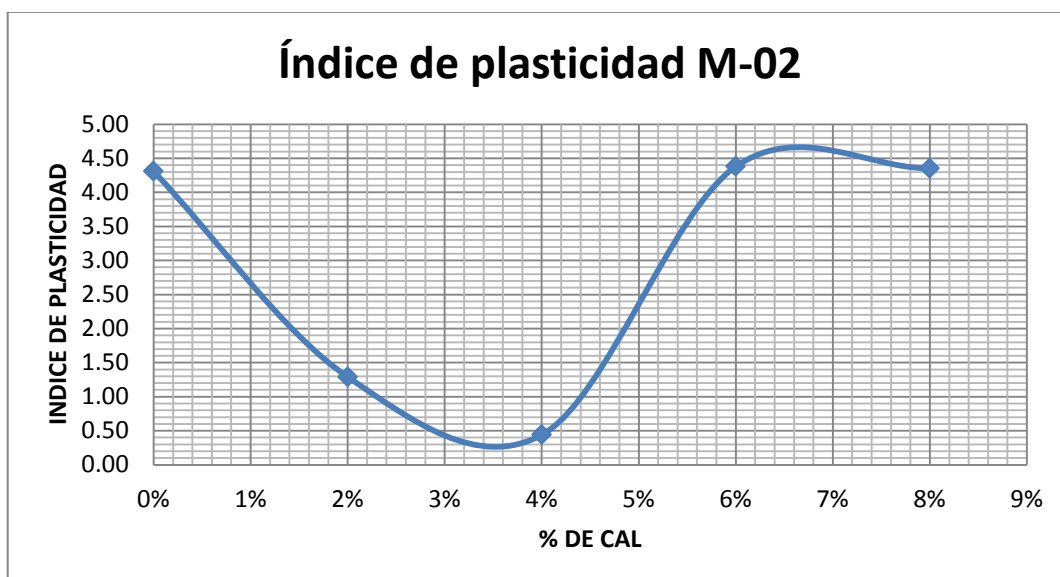


Imagen 23: Gráfico del índice de plasticidad suelos estabilizado M-02.

3. Ensayo de compactación

Tabla 17
Densidad máxima de suelo estabilizado

Muestra	N°	Profundidad (m)	Densidad máxima			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	2.18	2.20	2.30	2.40
2	C – 02	0.80	1.97	2.00	1.80	2.10

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

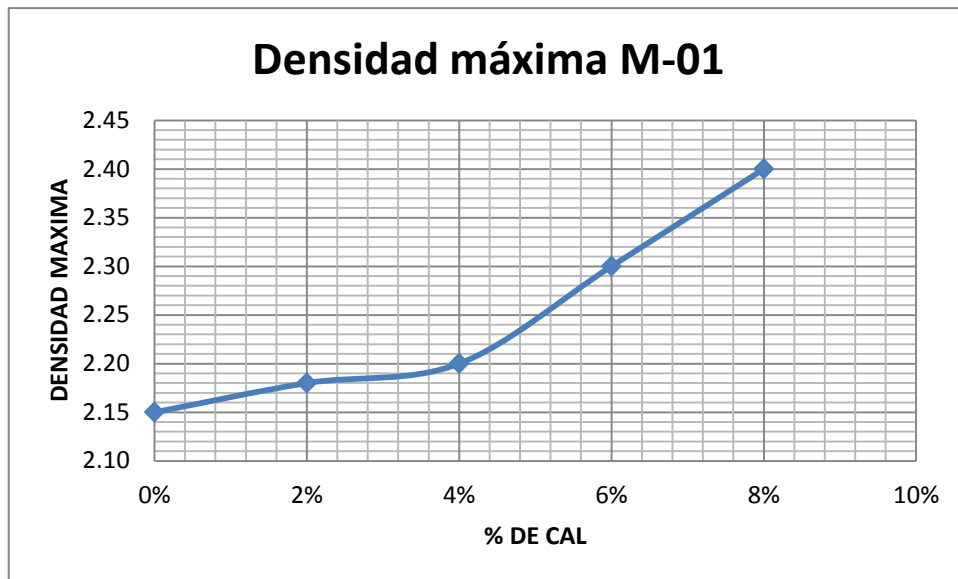


Imagen 24: Gráfico densidad máxima de suelo estabilizado M.01.

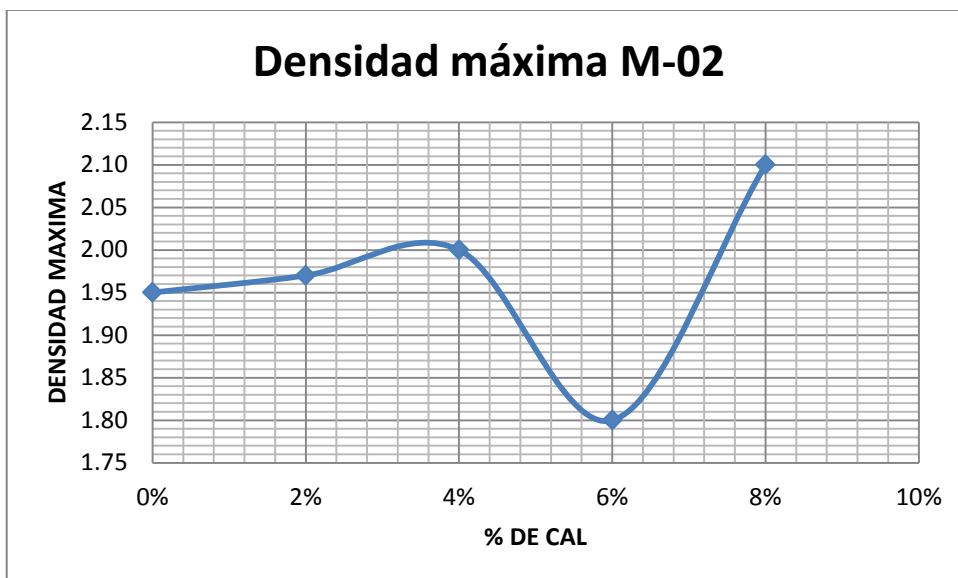


Imagen 25: Gráfico densidad máxima de suelo estabilizado M.02.

4. Humedad óptima

Tabla 18
Humedad óptima de suelo estabilizado

Muestra	N°	Profundidad (m)	Humedad óptima			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	9.00	4.80	8.00	9.00
2	C – 02	0.80	7.50	11.00	7.00	10.00

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

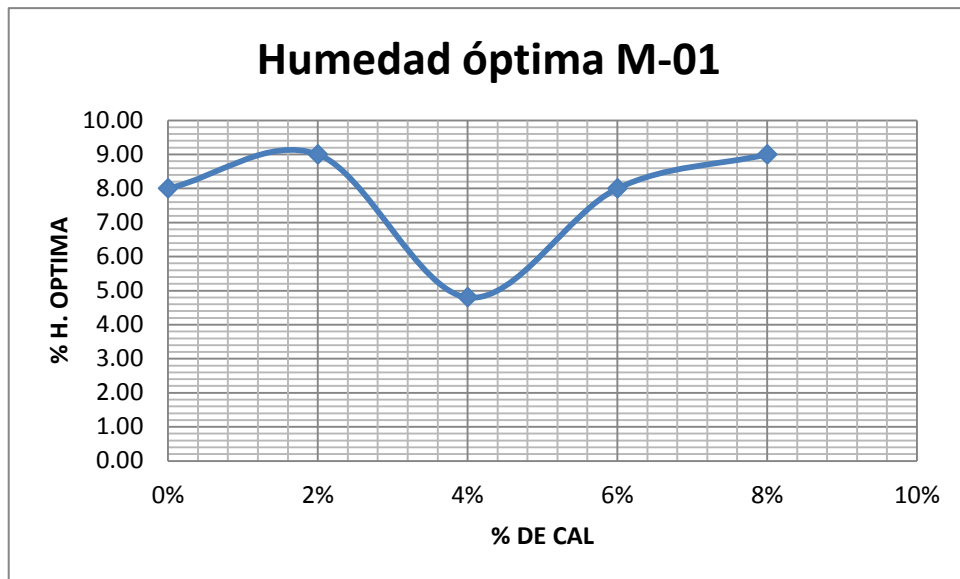


Imagen 26: Gráfico de humedad óptima de suelo estabilizado M-01.

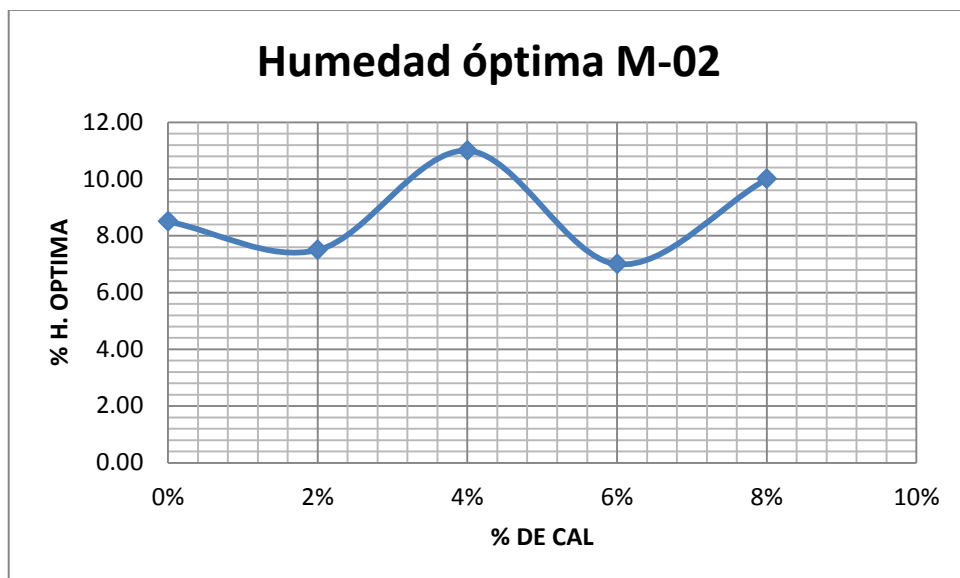


Imagen 27: Gráfico de humedad óptima de suelo estabilizado M-02.



Imagen 28: Ensayo de compactación suelo estabilizado.



Imagen 29: Ensayo de compactación suelo estabilizado

5. Valor de soporte de california (CBR)

El objetivo de este ensayo es determinar, si el suelo al ser modificado con cal cumpla con las especificaciones para ser utilizada como subrasante.

Tabla 19
Ensayos de CBR suelo estabilizado

Muestra	N°	Profundidad (m)	CBR			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	17.50	33.00	52.00	145.00
2	C – 02	0.80	24.50	28.50	39.00	68.00

Fuente: Resultados del laboratorio (Elaboración propia)

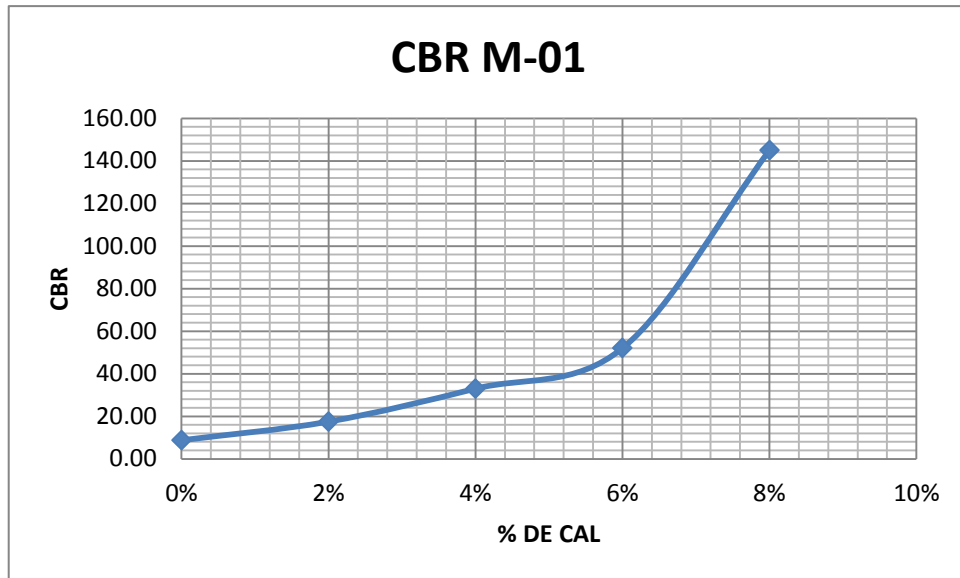


Imagen 30: Gráfico del CBR de suelo estabilizado M-01.

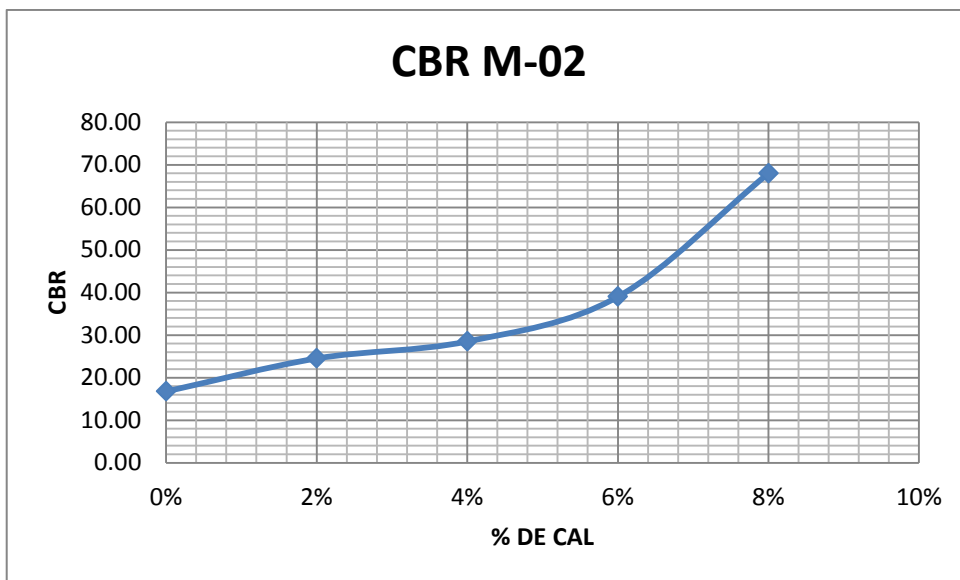


Imagen 31: Gráfico del CBR de suelo estabilizado M-02.



Imagen 32: Ensayo de CBR de suelo estabilizado.



Imagen 33: Ensayo de CBR de suelo estabilizado.

3.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Luego de haber realizado los ensayos de mecánica de suelos en el laboratorio, a continuación, se procede a realizar el análisis de los resultados obtenidos.

Para la obtención de cal necesaria para estabilizar el suelo, se ha realizado el ensayo de EADES & GRIM (ASTM D-6276) el cual consiste en la elaboración de especímenes de suelo cal en distintos porcentajes de cal con la finalidad de incrementar el pH de suelo y así obtener el porcentaje de cal que se aproxime a un pH de 12.4, siendo este porcentaje el necesario para estabilizar químicamente al suelo.

Mientras que para obtención de la cantidad de cal óptima para mejorar las características físicas del suelo, han realizado los siguientes ensayos de laboratorio para distintos porcentajes de suelo cal que a continuación se mencionan los ensayos realizados:

- Análisis granulométrico (MTC E 107)
- Límite líquido /MTC E 110)
- Índice de plasticidad (MTC E 111)
- Clasificación de suelos
- Proctor modificado (MTC E115)
- Valor relativo de soporte (CBR) (MTC E 132)

3.4.1. Propiedades del suelo en estado natural

a) Contenido de humedad

Luego de haber realizado la extracción de las muestras, se extrajo una muestra inalterada de alrededor de 150 gr de muestra, obteniéndose que en estado natural el suelo contenía un porcentaje de humedad del 9.44% en la muestra 01 y un porcentaje de humedad del 12.36% en la muestra 02.

b) Porcentaje que pasa la malla 200

Es importante clasificar el suelo de acuerdo al tamaño de las partículas, con la finalidad de saber con qué tipo de suelos se está trabajado. Al realizar este ensayo, se ha determinado que el porcentaje que pasa en la malla 200 en la muestra 01 es del 42.16% y el porcentaje que pasa en la malla 200 en la muestra 02 es del 31.04%. así mismo el $C_u=19.39$ $C_c=0.18$ en la muestra 01 y en la muestra 02 el $C_u=49.42$ $C_c=0.11$.

c) Límites de atterberg

De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos, la plasticidad del suelo basado en la carta de plasticidad los suelos ensayados se clasifican de la siguiente manera:

Límite líquido

El límite líquido de acuerdo al ensayo en la muestra 01 es del 22.7% y en la muestra 02 es del 24.30%

Límite plástico

El límite plástico de acuerdo a los resultados de los ensayos para la muestra 01 es del 21.60% y para la muestra 02 es del 20.00%

Índice de plasticidad

Conocido los límites líquido y plástico, ya se puede determinar el índice de plasticidad de cada una de las muestras, siendo las siguientes para la muestra 01 el índice de plasticidad es de 1.00 y para la muestra 02 el índice de plasticidad es de 4.30.

d) Ensayo de proctor modificado.

El objetivo de este ensayo es determinar el contenido de humedad óptimo que requiere el material para alcanzar el peso específico máximo. Para la muestra 01 la Densidad seca máxima de 2.15 gr/cm^3 se alcanza con un contenido de humedad óptimo de 8.00% mientras que en la muestra 02 la Densidad seca máxima de 1.95 gr/cm^3 se alcanza con un contenido de humedad óptimo de 8.50%.

e) Clasificación del suelo.

De acuerdo a los resultados del laboratorio, se procedió a la clasificación del suelo mediante el método SUCS optándose los siguientes resultados, para la muestra 01 el suelo es SM (arena limosa) y para la muestra 02 SC-SM (arena limo- arcillosa con grava).

a) Determinación del valor de soporte de california cbr

Este ensayo es el más importante, ya que con este se determina la capacidad admisible del suelo en estado natural dando los siguientes resultados, para la muestra 01 el CBR es de 8.75% y para la muestra 02 el CBR es de 16.75%.

3.4.2. Propiedades del suelo estabilizado con cal

3.4.2.1. Resultados del ensayo de EADES & GRIM

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de cal necesario para estabilizar sus propiedades físicas y mecánicas del suelo. Se realizaron 02 ensayos los cuales se incorporó cal de 0% hasta 8% en intervalos de 2% de cal en peso seco. Obteniéndose los siguientes resultados, que para la muestra 01 que es un suelo SM (arena limosa) el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo es del 3.00%, mientras que en la muestra 02 que viene a ser un suelo SC-SM (arena limo- arcillosa con grava) el porcentaje de cal necesario para estabilizarlo es de 5.00%.

3.4.2.2. Resultado de los ensayos de laboratorio del suelo estabilizado

límites de atterberg

Al añadirle cal al suelo, se modifica la plasticidad del mismo en forma apreciable, para lo cual se analiza los resultados obtenidos del laboratorio:

Para la muestra 01 que viene a hacer un suelos SM tiene un índice de plasticidad de en suelo natural de 1.02, cal para este tipo de suelo incrementa el límite líquido en un 87.60% al añadirle 2% de cal y al incrementar la proporción de cal en un intervalo de 2% el límite líquido disminuye hasta mantenerse constante y al mismo tiempo, solo incrementa

en un 31.20% el límite plástico al añadirle 2% de cal, a diferencia del límite líquido este se mantiene más estable no sufriendo grandes variaciones. Con respecto al índice de plasticidad, por lo tanto, se incrementa el índice de plasticidad en un 192.61% al añadirle 2% de cal. Tal como se muestran en los siguientes cuadros:

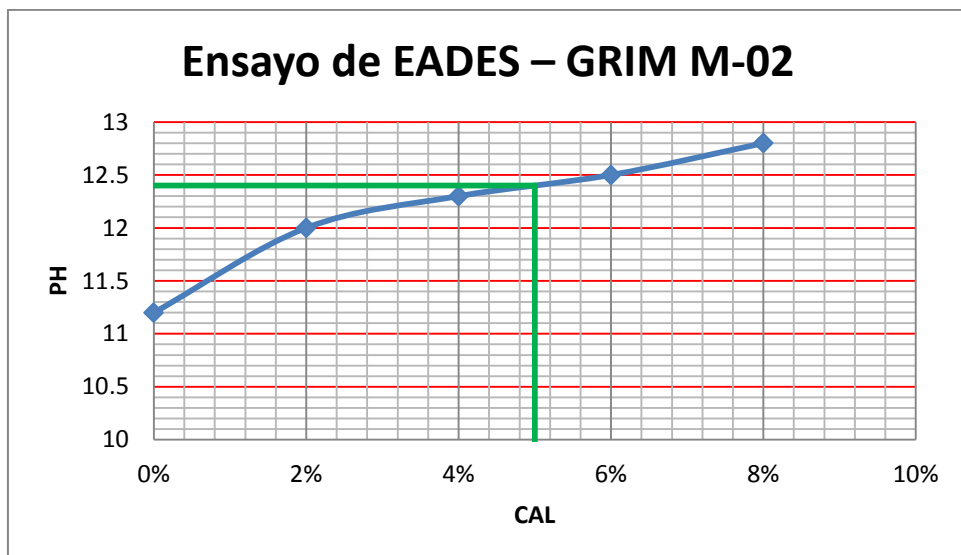
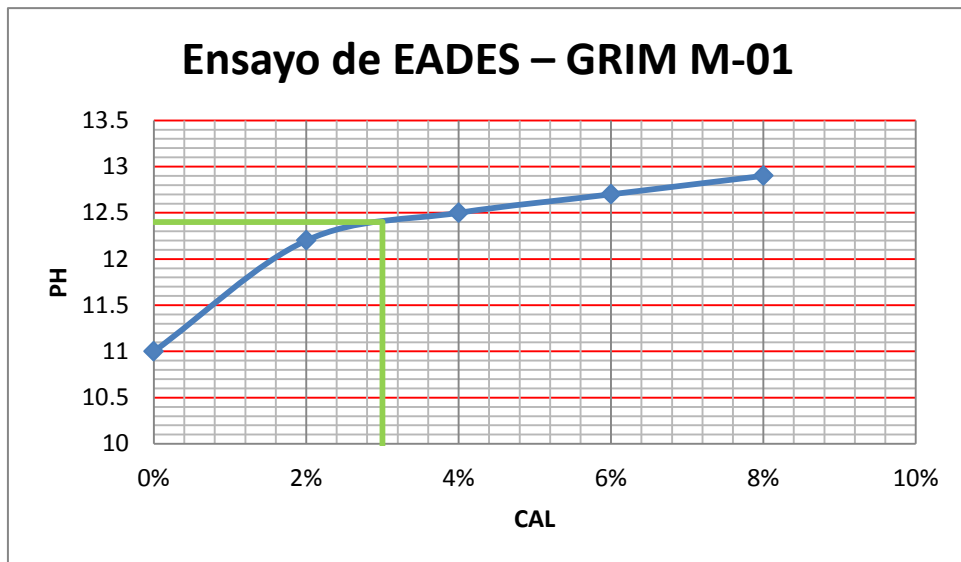
Muestra	N°	Profundidad (m)	Límite líquido			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	42.51	31.31	28.82	30.56
2	C – 02	0.80	27.93	21.69	35.01	34.96

Muestra	N°	Profundidad (m)	Límite plástico			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	28.71	23.77	24.04	23.24
2	C – 02	0.80	26.64	21.25	30.63	30.61

Muestra	N°	Profundidad (m)	Índice de plasticidad			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	13.80	7.54	4.78	7.32
2	C – 02	0.80	1.29	0.44	4.38	4.35

3.4.2.3. *Determinación del contenido de cal mediante el método de Eades & Grim*

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de cal necesario para estabilizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Para lo cual, se han realizado los ensayos con una variación de cal entre los límites de 0% a 8% en intervalos de 2%. Obteniéndose que para la muestra 01 es necesario un 3% de cal para estabilizar el suelo, mientras que en la muestra 02 es necesario la incorporación de 5% de cal para estabilizar el suelo. Tal como se muestran en los siguientes gráficos:



3.4.2.4. Valor de soporte de california (CBR)

Este ensayo es el más importante, ya que con este ensayo se determina el porcentaje de cal óptimo para incrementar la capacidad admisible del suelo ensayado. Para lo cual, se elaboraron muestras de suelo con cal incorporando 2, 4, 6 y 8% obteniéndose los siguientes resultados:

Para la muestra 01 los valores de CBR varían de acuerdo al incremento de cal de manera proporcional para un suelo con 2% de cal el CBR es de 17.50 sufriendo un incremento en un 150% y para un suelo con 8% de cal el CBR es de 145.00 sufriendo un incremento importante el valor de CBR.

Para el caso de muestra 02 por ser un suelo arenoso con un límite líquido inferior a 15% el CBR, no presenta mayor incremento ya que al agregarle 2% de cal el CBR se incrementa a 24.50 sufriendo un incremento del 146.27% y cuando se le agrega un 8% de cal el CBR es de 68.00 muy inferior al valor de CBR de la muestra 01.

Para tener una mejor idea se muestra a continuación la tabla de los valores de CBR.

Muestra	N°	Profundidad (m)	CBR			
			2%	4%	6%	8%
1	C – 01	0.80	17.50	33.00	52.00	145.00
2	C – 02	0.80	24.50	28.50	39.00	68.00

3.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.5.1. Conclusiones

Se concluye que la cantidad de cal necesaria para mejorar el índice de CBR en ambos suelos es de 8% del peso seco del suelo.

Se ha verificado y se concluye que al realizar el ensayo de Eades & Grim y al añadirle cal al suelo, el pH del suelo, se incrementa arriba de los 10.5 lo que permite romper las partículas de las arcillas y así formar productos cementantes que contribuyen a la resistencia del suelo.

Por otro lado, de acuerdo a los ensayos de Eades & Grim el cual nos indica el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo, para la muestra 01 es necesario agregarle 3% de cal para estabilizarlo y para la muestra 02 es necesario agregarle 5% de cal para estabilizarlo.

Al realizar la prueba de pH Eades & Grim, se ha determinado la cantidad de cal requerida para satisfacer las reacciones inmediatas de la cal con el suelo. Esta prueba nos proporciona la cantidad de cal necesaria para proporcionar las condiciones adecuadas para la reacción puzolánica a largo plazo que es responsable del desarrollo de la rigidez.

Las muestras que se analizaron de la Urbanización San Luis Baja por ser vías urbanas se rigen al Reglamento Nacional de Edificaciones específicamente a la norma CE.010 pavimentos urbanos en la que indica que el CBR para una capa de Subbase es de 80% y el CBR para una base es de 100%, Por lo tanto, los CBR del suelo natural no cumplen ya que su valor de CBR no es el adecuado para ser utilizado como Subbase o base. Fue por ello que mediante el uso de cal, se estabilizó químicamente el suelo con la finalidad de incrementar su capacidad de soporte CBR.

Basado en los resultados obtenidos del laboratorio de suelos, se concluye que para la muestra 01 se debe de añadir 8% de cal al suelo para incrementar para alcanzar un índice de CBR de 145.00 y así ser utilizado como base para un pavimento. Mientras que en la muestra 02 por ser un suelo arena limosa el suelo no adquiere mayores capacidades portantes ya que al añadirle 8% de cal solo se incrementó el índice de CBR hasta 68.00 no cumpliendo con lo señalado en la norma CE.010. Cabe indicar que de acuerdo a las recomendaciones de la norma y de la bibliografía estudiada este tipo de suelos reaccionan de mejor manera con el cemento.

También se puede concluir que el suelo estabilizado con cal se pueden hacer uso en los caminos vecinales y vías urbanas, siendo un requisito indispensable que las distintas capas de la estructura del pavimento tengan una resistencia adecuada de acuerdo a lo estipulado en las distintas normas vigentes tales como los manuales del Ministerio de Transportes y el Reglamento Nacional de Edificaciones.

Cabe indicar que se cuentan con diferentes métodos para estabilizar suelos arcillosos, pero en el presente proyecto de tesis se ha obrado por utilizar la cal por su mayor comercialización y bajo costo, y al mismo tiempo los suelos arcillosos tienden a mejorar sus propiedades como se comprobó en este proyecto de tesis, además de que el suelo

arcilloso presenta mejor comportamiento, mejor manejabilidad y una reacción química inmediata.

La estabilización con cal provoca una mejora significativa en la textura y estructura del suelo mediante la reducción de la plasticidad y proporcionando ganancia de resistencia puzolánica.

3.5.2. Recomendaciones

La utilización de cal en la estabilización del suelo mejora en más del 100% el índice del CBR.

Se recomienda usar el contenido de humedad óptima en lugar de la humedad natural del suelo para determinar el índice de CBR, ya que con eso se logra incrementar el CBR de mejor manera.

Los ensayos de suelo-cal especialmente en los límites de consistencia se tendrán que realizar en el mismo momento, ya que al mezclarlas con agua se encarecen con el tiempo.

Se recomienda especial cuidado al realizar la mezcla de suelo con la cal, para lograr una buena afinidad de ambos materiales, y con ello tener mejores resultados de los ensayos.

El suelo estabilizado con cal no requiere ser compactado de manera inmediata, siendo una ventaja frente a otros estabilizantes como el cemento.

Se recomienda determinar la cantidad de cal aproximada mediante la prueba del pH Eades & Grim con la finalidad de proporcionar una reacción puzolánica y así estabilizar el suelo.

CAPÍTULO IV

4.1. ASPECTO ADMINISTRATIVO

4.1.1. Cronograma de actividades

N	Descripción de la actividad	Mes 01	Mes 02	Mes 03	Mes 04	Mes 05															
		Semanas																			
1.00	Presentación del plan de tesis																				
2.00	Aprobación del plan de tesis																				
3.00	Revisión y observaciones del proyecto de tesis																				
3.01	Levantamiento de datos de campo																				
3.02	Pruebas en laboratorio																				
3.03	Presentación del primer informe del proyecto de tesis																				
4.00	levantamiento de observaciones																				
5.00	presentación del proyecto de tesis																				
6.00	aprobación del informe final																				
7.00	Revisión y ajuste del informe final																				
8.00	presentación del informe final de tesis																				
9.00	Aprobación del informe final																				

BIBLIOGRAFÍA

- ASSIS., A. (1988). *MECANICA DE SUELOS*. <http://html.rincondelvago.com/capacidad-de-soporte-del-suelo.html>.
- ÁVILA BARAY, HECTOR LUIS. (2006). *Introduccion a la Metodologia de la Investigacion Edicion Electronica*. Mexico.
- EMPLEO DE CAL EN SUELOS ARCILLASOS. (2006). *MECANICA DE SUELOS. EMPLEO DE LA CAL EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS*.
- GÓMEZ BETANCOURT, EDGAR. (2002). *INGENIERIA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS TOMO I*. COLUMBIA: AGORA EDITORES.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, ROBERTO, FERNÁNDEZ COLLADO, C., & BAPTISTA LUCIO, P. (2006). *Metodología de la Investigación. Cuarta Edición. México: McGraw Hill*.
- HUEZO MALDONADO , H., & ORELLANA MARINEZ , A. (FEBRERO de 2009). *TESIS. GUIA BASICA PARA ESTABILIZACION DE SUELOS CON CAL EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR EN EL SALVADOR. SALVADOR .*
- ICG, & GERENCIA, I. D. (2010). *ESTABILIZACION DE SUELO-CAL. ESTABILIZACION DE SUELO-CAL DE LA SUB RASANTE DE LAS VIAS URBANAS DE LA CIUDAD DE JULIACA*, 11.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA. (2011). *TESIS. ESTABILIZACION DE UN SUELO ARCILLOSO DE CAL HIDRATADA PARA SER UTILIZADA COMO CAPA SUBRASANTE*. OBREGON, SONORA.
- MTC. (2001). *PROYECTO . MEJORAMIENTO VIAL DE LA CARRETERA HUANUCO- TINGO MARIA-PUCALLPA SECTOR AGUAYTIA - PUCALLPA*. PUCALLPA, HUANUCO , UCAYALI .

- MTC. (2011). PROYECTO. *REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA CHONGOYAPE COCHABAMBA – CAJAMARCA TRAMO LLAMA - COCHABAMBA*. CAJAMARCA, CAJAMARCA.
- MTC, & Manual de Suelos, G. (2013). *Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pamientos*. Lima.
- MTC, & MTC; TÉRMINOS, GLOSARIO DE. (2018). *GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL*. LIMA.
- NACIONAL LIME ASSOCIATION. (ENERO de 2004). MANUAL DE ESTABILIZACION DE SUELO TRATADO CON CAL. *ESTABILIZACION Y MODIFICACION CON CAL*.
- RNE, & CE.020. (2016). *REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES*. LIMA .
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA. (2014). TESIS . *EFFECTO DE LA CAL COMO ESTABILIZANTE DE UNA SUBRASANTE DE SUELO ARCILLOSO*. CAJAMARCA, CAJAMARCA.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. (2012). TESIS. • “*ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA Y/O SUB BASE DE PAVIMENTOS*”. LIMA, LIMA, LIMA.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. (s.f.). C.B.R. *CALIFORNIA BEARING RATIO*, (pág. 47). LIMA.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO. (2015). TESIS . *GUÍA BÁSICA PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR EN LA PROVINCIA DE SAN ROMÁN*. PUNO , PUNO.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ. (2016). TESIS.

UTILIZACIÓN DE BOLSAS DE POLIETILENO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELO A NIVEL DE LA SUBRASANTE EN EL JR. AREQUIPA, PROGRESIVA KM 0+000 - KM 0+100, DISTRITO DE ORCOTUNA, CONCEPCIÓN. ORCOTUNA, HUANCAYO.

UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES. (2016). TESIS . • *ESTABILIZACIÓN DE*

SUELOS COHESIVOS POR MEDIO DE ADITIVOS (Eco Road 2000) PARA PAVIMENTACIÓN EN PALIAN – HUANCAYO – JUNÍN. HUANCAYO , JUNIN.

UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE. (2015). TESIS . *DETERMINACIÓN DE LA*

RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE INCORPORANDO CAL ESTRUCTURAL EN EL SUELO LIMO ARCILLOSO DEL SECTOR 14 MOLLEPAMPA DE CAJAMARCA. MOLLEPAMPA, CAJAMARCA.

Los Anexos obran en Biblioteca Central